

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Analýza vlastností asynchronního motoru
napájeného ze softstartéru pomocí simulace**

**Property Analysis of Induction Motor
Supplied by Softstarter Using Simulation**

2011

Pavel Letocha

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Letocha**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika
Téma: **Analýza vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru pomocí simulace**
Property Analysis of Induction Motor Supplied by Softstarter Using Simulation

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru
2. Sestavení matematického a simulačního modelu pro analýzu vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru
3. Simulační ověření vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího práce


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011




doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vykonal samostatně. Uvedl jsem všechny použité zdroje, ze kterých jsem čerpal.

Rád bych zde poděkoval všem, kteří mi byli oporou a jakkoliv mi byli nápomocni při tvorbě této bakalářské práce. Na prvním místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za ochotu a pomoc při konzultacích a poskytnutí podkladů. Dále bych velmi rád poděkoval své rodině za podporu během celého dosavadního studia.

V Ostravě, dne 26. 4. 2011

Podpis.....

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je analyzovat na základě rozborů, zpracovaných modelů a následných simulací vlastností asynchronního motoru a rovněž vlastností zařízení softstartéru, ze kterého je daný motor napojen. Simulační modely a všechny rozborů byly řešeny pro pohon s asynchronním motorem s kotvou nakrátko, u kterého jsou uplatněny zjednodušující předpoklady včetně zanedbání elektromagnetických dějů. K řešení a simulaci byly použity celkem dva asynchronní motory. Simulační modely byly sestaveny v nádstavbové části software Matlab Simulink verze 7.8.0 pomocí dostupných bloků v knihovně s podporou m-file sestavených v samotném Matlabu.

Na příslušných simulačních modelech byly postupně odsimulovány průběhy výstupních veličin v závislosti na čase a na otáčkách pro různé varianty průběhů výstupního napětí ze softstartéru a pro různé varianty momentů pracovního mechanismu. Tím jsme si ověřili korektnost sestavení a zpracování matematického a simulačního modelu asynchronního motoru napojeného ze softstartéru, analýzu jejich vlastností s možností použití předložených výsledků k porovnání s údaji pohonů se softstartérem realizovaných v praxi.

Klíčová slova

Asynchronní motor, softstartér, matematický model, simulační model, simulace, Matlab, Simulink, rozběhová rampa, moment motoru, proud motoru, otáčky motoru, dynamický moment, moment pracovního mechanismu, momentová charakteristika, proudová charakteristika, výstupní průběhy

Abstract

The aim of this Bachelor Thesis is to analyze features of an induction motor and also features of a soft-starter device from which the particular motor is connected, on the basis of the analyses, prepared models and consequent simulations. Simulation models and all the analyses were designed for the drive unit with induction motor with short-circuit armature, where some simplifying assumptions, including the neglect of electromagnetic phenomena, were also applied. There were two induction motors used for the solutions and simulation. Simulation models were developed in the follow-up part of the software of Matlab - Simulink, version 7.8.0, by using the available blocks in the library with the support of m-file compiled in the Matlab itself.

In the particular simulation models, there was successive de-simulation of the courses of output values depending on the time and rotation speed for different variants of the courses related to output voltage from the soft starter and for different variants of the working mechanism torques. This is how we verified the correctness of the preparation and processing of the mathematical and simulation model of the induction motor connected from the soft starter as well as an analysis of their features with the possibility of using the results presented for comparison with the data of drives related to the soft starter implemented in practice.

Key Words

Induction motor, soft starter, mathematical model, simulation model, simulation, Matlab, Simulink, start-up ramp, torque of the motor, current of the motor, rotation speed of the motor, dynamic torque, torque of working mechanism, torque characteristics, current characteristics, output course

Seznam základního použitého označení

Zkratky

AM	asynchronní motor
MCH	momentová charakteristika motoru
MCH _{pm}	momentová charakteristika pracovního mechanismu
PCH	proudová charakteristika motoru

Číselná identifikace v
grafech ze Simulinku:

11	varianta $Us-1$ a $Mpm-1$
21	varianta $Us-2$ a $Mpm-1$
31	varianta $Us-3$ a $Mpm-1$
41	varianta $Us-4$ a $Mpm-1$
12	varianta $Us-1$ a $Mpm-2$
22	varianta $Us-2$ a $Mpm-2$
32	varianta $Us-3$ a $Mpm-2$
42	varianta $Us-4$ a $Mpm-2$
13	varianta $Us-1$ a $Mpm-3$
23	varianta $Us-2$ a $Mpm-3$
33	varianta $Us-3$ a $Mpm-3$
43	varianta $Us-4$ a $Mpm-3$

Značky a symboly

$\cos\varphi$	[-]	účinník
f	[Hz]	frekvence
f_n	[Hz]	jmenovitá frekvence
f_s	[Hz]	snížená frekvence
I	[A]	proud
I_0	[A]	proud motoru naprázdno
I_{Is}	[A]	proud statoru
I_{IsPCH}	[A]	proud statoru ze zrekonstruované proudové charakteristiky
I_{2s}	[A]	proud rotoru při skluzu s
I_{2k}	[A]	proud rotoru při skluzu $s = 1$ (motor nakrátko)
I_{Fe}	[A]	proud rezistoru, který představuje ztráty v železe
I_{zab}	[A]	záběrný proud
I_μ	[A]	magnetizační proud
J	[kgm ²]	moment setrvačnosti
J_c	[kgm ²]	celkový moment setrvačnosti
k_u	[-]	poměr napětí
M	[Nm]	moment
M_d	[Nm]	dynamický moment
M_{max}	[Nm]	maximální moment (moment zvratu)
M_{maxn}	[Nm]	jmenovitý maximální moment (pro U_n a f_n)
M_{MCH}	[Nm]	moment ze zrekonstruované momentové charakteristiky
M_n	[Nm]	jmenovitý moment
M_{pm}	[Nm]	moment pracovního mechanismu (zatěžovací moment)
M_{zab}	[Nm]	záběrný moment
n	[ot/min]	otáčky
n_n	[ot/min]	jmenovité otáčky
n_0	[ot/min]	synchronní otáčky
η	[%]	účinnost
p	[-]	počet pólových dvojic - polpárů
P	[W]	výkon
P_I	[W]	příkon
$P_{Cu2}=P_j$	[W]	ztráty v železe (Joulovy ztráty)

P_m	[W]	mechanický výkon
P_σ	[W]	výkon přenášený vzduchovou mezerou
q_m	[-]	momentová přetížitelnost
R	[Ω]	činný odpor
R_l	[Ω]	odpor vinutí statoru
R_{2l}	[Ω]	odpor vinutí rotoru přepočtený na stator
R_{Fe}	[Ω]	ztráty v železe
s	[-]	skluz
s_n	[-]	jmenovitý skluz
s_{zv}	[-]	skluz zvratu
s_{zvn}	[-]	jmenovitý skluz zvratu (pro U_n a f_n)
t	[s]	čas
T_{roz}	[s]	doba rozběhu
U	[V]	napětí
U_f	[V]	fázové napětí
U_0	[V]	základní napětí pro rozběhovou rampu
U_n	[V]	jmenovité napájecí napětí
U_p	[V]	počáteční napětí u tzv. kick-startu
U_s	[V]	vstupní napětí pro motor
U_s-1 až U_s-4	[V]	varianty zvoleného vstupního napětí pro motor (výstupního napětí ze softstartéru)
X_k	[Ω]	reaktance vinutí nakrátko
$X_{\sigma l}$	[Ω]	reaktance vinutí statoru
$X_{\sigma 2l}$	[Ω]	reaktance vinutí rotoru přepočtená na stator
X_μ	[Ω]	magnetizační reaktance
$\varphi_{1,2}$	[°]	fázový úhel
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
ω_0	[rad/s]	úhlová rychlost synchronní

Úvod	1
1 Teoretický rozbor vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru	2
1.1 Princip činnosti asynchronního motoru	2
1.2 Asynchronní motor v nevýbušném provedení a popis základních částí	3
1.3 Úplné a zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru	4
1.4 Zjednodušující předpoklady pro řešení asynchronního motoru	4
1.5 Rozběh asynchronního motoru	5
1.6 Typické průběhy proudu a momentu pro obecný asynchronní motor a pro odstředivý ventilátor	5
1.7 Princip činnosti softstartéru	7
1.8 Softstartér v nevýbušném provedení	7
1.9 Základní způsoby připojení softstartéru k asynchronnímu motoru	8
2 Matematický a simulační model asynchronního motoru napájeného ze softstartéru	9
2.1 Odvození Klossova vztahu, vztahy pro výpočet statorového proudu	9
2.2 Způsoby řízení rozběhu asynchronního motoru pomocí softstartéru	12
2.3 Specifikace základních parametrů průběhů výstupních napětí ze softstartéru a průběhů momentů pracovního mechanismu	13
2.4 Řešení simulačního modelu asynchronního motoru č. 1, u kterého není od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky	14
2.4.1 Parametry asynchronního motoru č. 1	14
2.4.2 Výpočet dalších potřebných parametrů pro motor č. 1	14
2.4.3 Základní simulační model asynchronního motoru č. 1	15
2.5 Řešení simulačního modelu asynchronního motoru č. 2, u kterého je od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky	16
2.5.1 Parametry asynchronního motoru č. 2	16
2.5.2 Změřená zadaná momentová a proudová charakteristika motoru č. 2 od výrobce	17
2.5.3 Zrekonstruovaná momentová a proudová charakteristika motoru č. 2	18
2.5.4 Základní simulační model asynchronního motoru č. 2	19
2.5.5 Příklady výpočtu záběrných momentů a proudů pro oba asynchronní motory	20
3 Simulační ověření vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru	21
3.1 Simulační ověření asynchronního motoru č. 1, u kterého není od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky	21
3.1.1 Průběhy variant výstupního napětí ze softstartéru (vstupního napětí pro motor č. 1)	21
3.1.2 Průběhy variant momentu pracovního mechanismu pro motor č. 1	21
3.1.3 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-1}	22-25
3.1.4 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-2}	26-29
3.1.5 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-3}	30-33
3.1.6 Srovnání jednotlivých průběhů motoru č. 1 pro vybrané napětí U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}	34-35
3.2 Simulační ověření asynchronního motoru č. 2, u kterého je od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky	36
3.2.1 Průběhy variant výstupního napětí ze softstartéru (vstupního napětí pro motor č. 2)	36
3.2.2 Průběhy variant momentu pracovního mechanismu pro motor č. 2	36
3.2.3 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-1}	37-40
3.2.4 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-2}	41-44
3.2.5 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-3}	45-48
3.2.6 Srovnání jednotlivých průběhů motoru č. 2 pro vybrané napětí U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}	49-50
3.3 Celkové zhodnocení odsimulovaných průběhů	50-51
Závěr	52
Seznam použitých zdrojů	53
Přílohy	54-56

Úvod

V současné době systematického technického rozvoje se stále ve větší míře uplatňují střídavé pohony s asynchronními motory. Jsou jednodušší, ekonomicky výhodnější a především kladou menší nároky na údržbu zařízení než pohony s motory stejnosměrnými. Téměř ve všech aplikacích pohonů se střídavými motory je provozně řešena jednak regulace otáček elektromotorů a jednak regulace rozběhu elektromotorů s ohledem na proudové rázy v napájecí síti. Tyto uvedené regulace se většinou řeší společně pomocí moderních tranzistorových nebo tyristorových měničů (např. měnič kmitočtu), ale v některých aplikacích je provozně a především ekonomicky výhodnější řešit regulaci střídavého pohonu pouze změnou velikostí napájecího napětí pro elektromotor při konstantním kmitočtu napájecí sítě (např. softstartér). Tato úvaha a případné řešení ovšem platí velmi omezeně a má své opodstatnění a význam pouze pro pohon s asynchronním motorem, který je zatěžován momentem pracovního mechanismu s ventilátorovou neboli kvadratickou charakteristikou. Na základě provedených experimentů a výpočtů vyplývá, že takto konfigurovaný pohon lze řídit v prakticky celém rozsahu napájecích napětí pro elektromotor. Je nutno si ovšem uvědomit, že při realizaci je nutno počítat s poměrně nízkou účinností a také výrazným poklesem momentu. Před realizací navrhovaného pohonu je vhodné a často bezpodmínečně nutné si daný pohon předem odměřit, nasimulovat a poté přistoupit k samotné realizaci řešení konkrétního pohonu. V praxi totiž není vždy možnost pohon vypnout a provést potřebná měření a nastavení, jelikož jejich vypnutí by mohlo způsobit ekonomické nebo provozní problémy ve výrobě. Proto je výhodné a také žádoucí řešit již ve stádiu návrhu pohonu provedení jeho softwarové simulace dle svých stanovených podmínek a provozních potřeb.

Základním stavebním kamenem této bakalářské práce je vytvoření a zpracování potřebných modelů asynchronního motoru napájeného ze softstartéru a jeho jednotlivé simulace v prostředí Matlab – Simulink. Aby bylo možno řešit simulační modely, je nutno znát alespoň základní parametry daného elektromotoru případně změřené charakteristiky od výrobce. V této práci budou řešeny dva různé asynchronní motory a vycházet jednak ze zadaných a vypočtených parametrů pro první elektromotor (motor č. 1) a jednak ze změřené zadané momentové a proudové charakteristiky předložené výrobcem pro druhý elektromotor (motor č. 2). Z tohoto důvodu je zapotřebí si před samotnou realizací jednotlivých simulací vytvořit pro motor č. 1 jak matematický tak i simulační model a pro motor č. 2 zrekonstruovat zadané změřené charakteristiky od výrobce motoru a teprve poté vytvořit vlastní simulační model.

Princip činnosti asynchronního motoru a softstartéru, náhradní schéma motoru, zjednodušující předpoklady, základní schémata připojení a typické průběhy asynchronního motoru jsou obsahem první kapitoly. Ve druhé kapitole je nejprve proveden rozbor a zpracování matematického modelu AM a poté zpracovány základní simulační modely obou motorů na základě zadaných parametrů a změřených zadaných charakteristik. Ve třetí kapitole je provedeno simulační ověření vlastností obou AM napájených ze softstartéru včetně jednotlivých průběhů zpracovaných v Simulinku pro různé varianty průběhů výstupních napětí ze softstartéru a pro různé varianty momentů pracovního mechanismu včetně celkového zhodnocení odsimulovaných průběhů.

V závěru je provedena rekapitulace postupů, metod a výsledků s výčtem přínosů této bakalářské práce a možností použití asynchronních motorů napájených ze softstartéru v praxi.

1 Teoretický rozbor vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru

1.1 Princip činnosti asynchronního motoru [1]

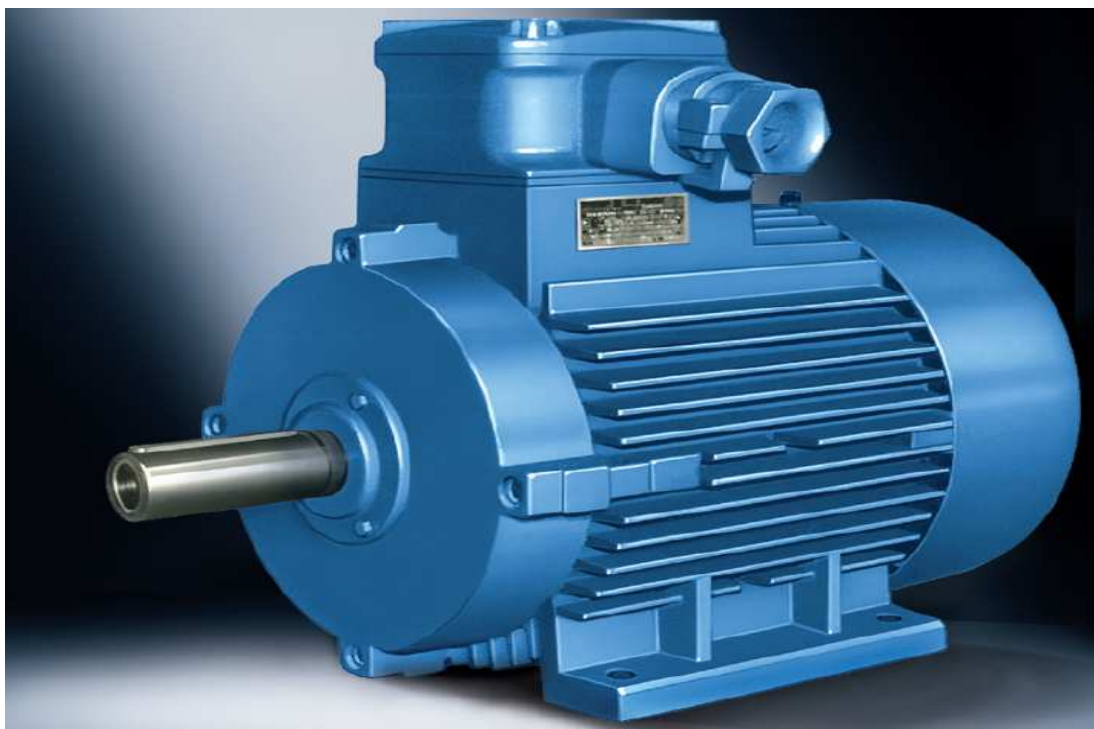
Indukční motor je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod je malou mezerou rozdělen na dvě části: stator a rotor. Obě části jsou opatřeny vinutím. Jedno vinutí (obvykle statorové) je připojeno na zdroj střídavého napětí a druhé vinutí (obvykle rotorové) je spojeno nakrátko a proud v něm takto vzniká elektromagnetickou indukcí, podobně jako u transformátoru. Odtud vyplývá i jeho název - indukční stroj. Nejčastějším druhem indukčního stroje je trojfázový indukční motor, který využívá silového působení statorového proudu (z napájecí sítě) a rotorového proudu (indukovaného ve vinutí spojeném nakrátko). Trojfázový indukční motor je jednoduchý, v provozu spolehlivý a nevyžaduje téměř žádnou zvláštní obsluhu a údržbu. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů, a to od několika wattů až do několika desítek megawattů s velmi širokým rozsahem otáček (od desítek otáček za minutu až po 100 000 ot/min).

Asynchronní motor s kotvou nakrátko je díky své konstrukční jednoduchosti nejužívanějším motorem. Princip činnosti asynchronního motoru je založen na využití točivého magnetického pole. Statorové vinutí motoru je napájeno třífázovým napětím, které v něm vyvolává souměrný střídavý proud. Protékající třífázový proud generuje ve statoru točivé elektromagnetické pole. Toto pole rotuje (obíhá, otáčí se) synchronní úhlovou rychlostí ω_0 . Synchronní rychlost je úměrná synchronním otáčkám n_0 , které závisí na frekvenci f napájecího napětí asynchronního motoru a počtu pólových dvojic (pólů) p . Rotující elektromagnetické pole indukuje indukované napětí do vodičů rotorového vinutí nakrátko. Indukované napětí vyvolá v klecovém vinutí rotoru asynchronního motoru elektrický proud.

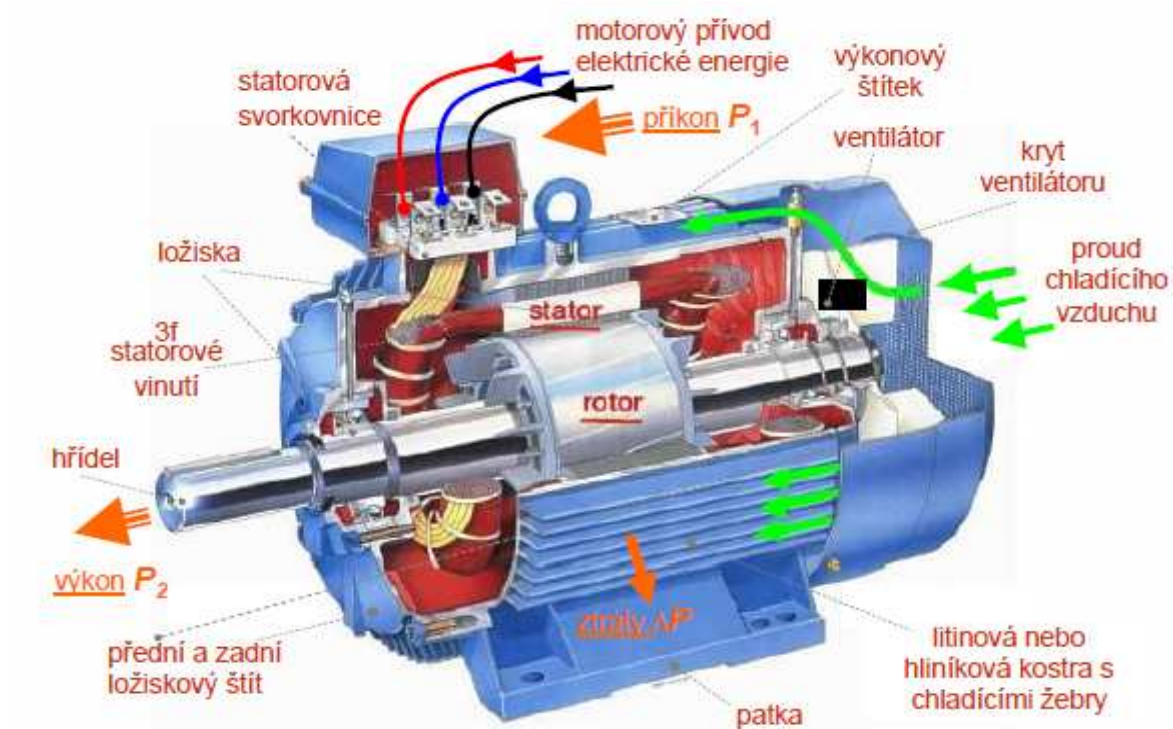
Vznik tažné síly

Nejjednodušší rotor indukčního motoru je tvořen jedním závitem spojeným nakrátko, který je vložen do točivého magnetického pole. Velikost magnetického toku procházejícího plochou stojícího závitu se během otáčení točivého magnetického pole mění. Změnou magnetického toku se v tomto závitě indukuje napětí, které jím protlačuje značný proud. Tento proud vybudí své magnetické pole, které spolu s točivým polem statoru vytvoří točivý moment. Indukční motor se takto sám roztočí, což je jeho velkou provozní výhodou. Jestliže se uvažuje ideální indukční motor bez jakýchkoli mechanických ztrát, roztočí se jeho rotor po rozběhu na synchronní otáčky a bude se otáčet souhlasně s točivým magnetickým polem. Jeho vodiče neprotínají žádné indukční čáry a neindukuje se v nich proud. Točivý moment by byl nulový a rotor by se dál otáčel jen setrvačností. Jestliže se však rotor mechanicky zatíží, musí se otáčení zpomalit, takže indukční čáry protínají vodiče, ve kterých se indukuje proud potřebný pro vznik tažné síly. Čím více se motor zatíží, tím větší musí být rotorový proud, a tedy tím pomaleji se musí rotor otáčet. S rostoucím zatížením se otáčky indukčního motoru postupně snižují. Pokles otáček rotoru n vzhledem k otáčkám točivého magnetického pole n_0 se nazývá skluz s . Tento skluz nábývá hodnot podle odporu rotorového vinutí průměrně 5 %, přičemž menší motory mají skluz větší než velké motory.

1.2 Asynchronní motor v nevýbušném provedení a popis základních částí

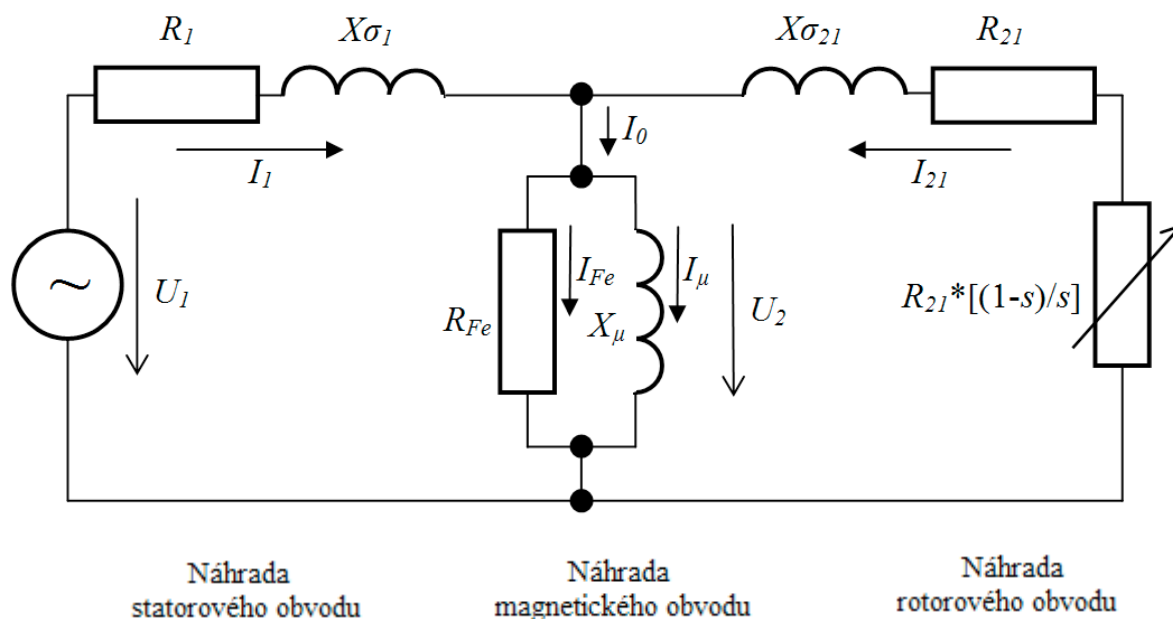


Obr. 1 - Asynchronní motor v nevýbušném provedení [2]

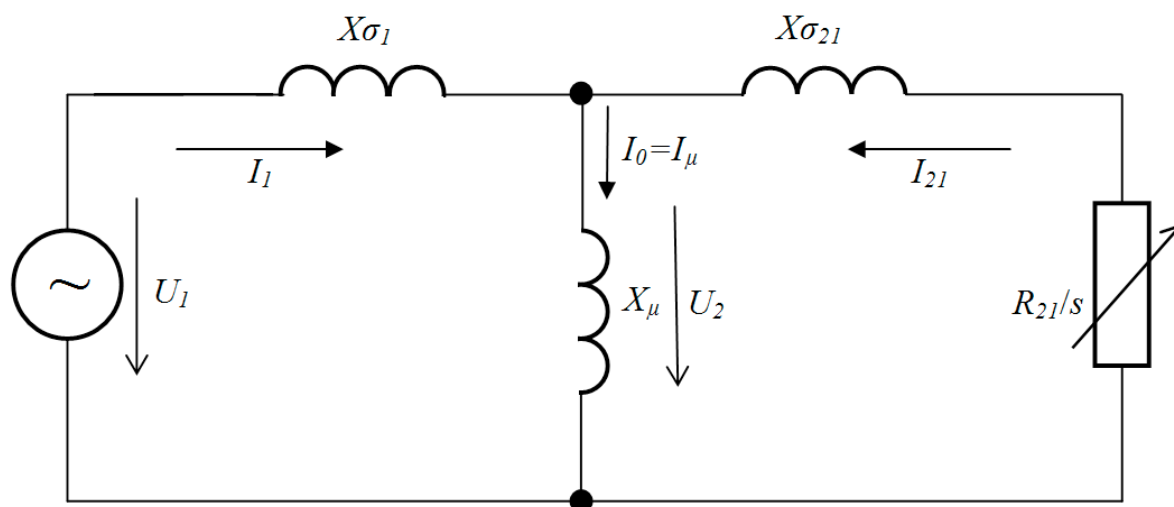


Obr. 2 - Asynchronní motor s popisem základních částí [8]

1.3 Úplné a zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru



Obr. 3a - Úplné náhradní schéma AM [7]



Obr. 3b - Zjednodušené náhradní schéma AM (jsou zanedbány ztráty v železe a odpor statoru)

1.4 Zjednodušující předpoklady pro řešení asynchronního motoru [1]

V této práci se bude vycházet při řešení asynchronních motorů z následujících zjednodušujících předpokladů:

1. Asynchronní motor je symetrický, jeho vinutí je sinusově rozloženo po obvodu stroje a vzduchová mezera je konstantní
2. Ztráty v železe jsou zanedbány

3. Elektromagnetické děje jsou zanedbány
4. Odpor statoru je rovněž zanedbáván
5. Odporů a indukčností jsou stejné ve všech fázích a konstantní, tj. zanedbávají se:
 - změny odporů na teplotě
 - nasycení magnetického obvodu
 - hysteréze magnetického obvodu
 - změny odporů a indukčností na kmitočtu (skinefekt)
6. Nulový vodič není připojen

1.5 Rozběh asynchronního motoru [1], [9]

Rozběh nepůsobí problémy u motorů malého výkonu do několika kW, tyto motory se proto připojují k napájecí síti přímo a velké záběrné proudy obvykle neohrožují síť a k ní připojené další spotřebiče. Přímé připojení k síti motorů větších výkonů není přípustné a proto se velké záběrné proudy při rozběhu zmenší tím, že se při spouštění motoru redukuje jeho napájecí napětí.

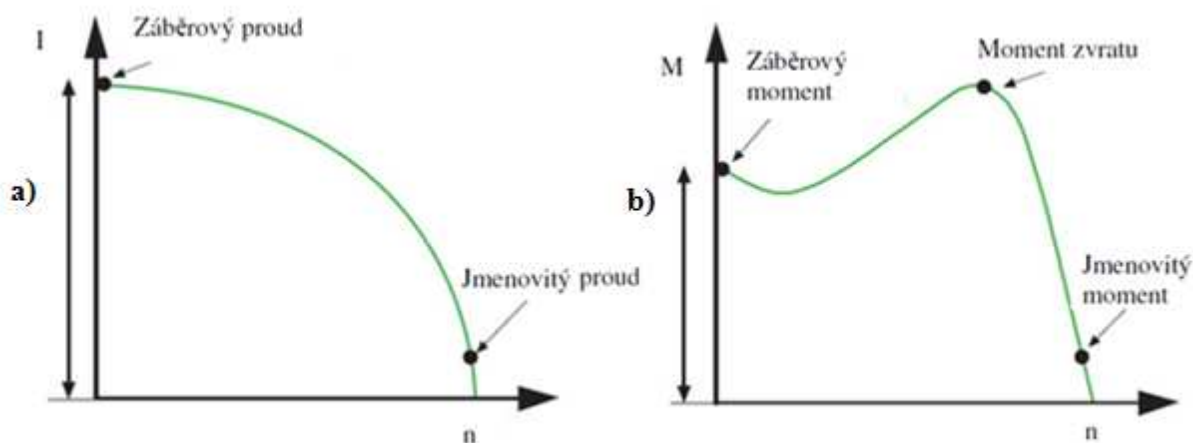
Používají se tyto způsoby rozběhu:

- 1) Přepínání vinutí při rozběhu – velmi užívaný je způsob přepínání hvězda – trojúhelník (Y/D).
- 2) Mezi síť a motor se zařadí předřadná impedance, nejčastěji reaktor.
- 3) Napětí sítě se sníží pomocí transformátoru (autotransformátoru) – tento způsob se používá velmi málo, protože je poměrně nákladný.
- 4) Napětí sítě se sníží pomocí polovodičového měniče střídavého napětí, tzv. softstartéru.

Polovodičový měnič napětí umožňuje spojitě řídit velikost napětí na motoru. Nastavení výsledných parametrů je kompromisem mezi velikostí momentu motoru (ten klesá s kvadrátem napětí) a velikostí rozběhového proudu (ten klesá lineárně s napětím).

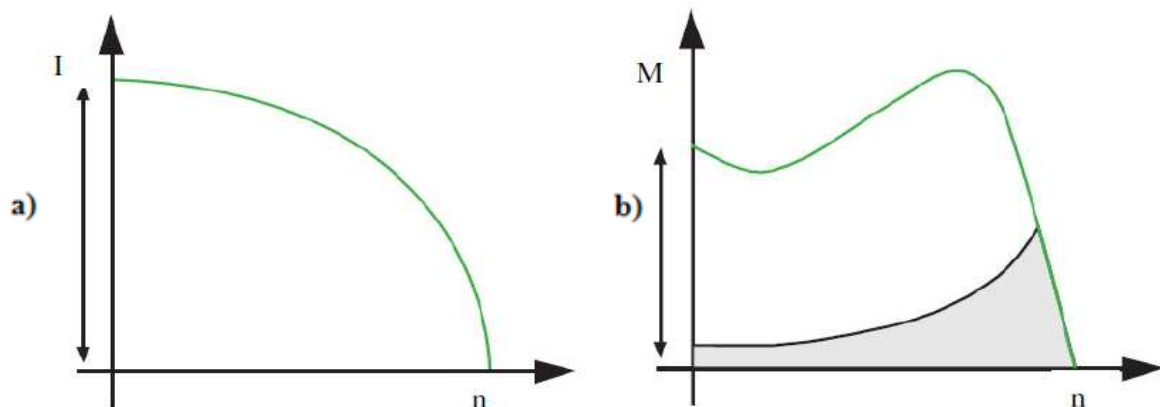
Všechny způsoby omezení rozběhového proudu snižují napětí na svorkách motoru. Tato práce se bude zabývat posledním výše uvedeným způsobem rozběhu AM, kdy napájecí napětí pro motor je sníženo pomocí softstartéru.

1.6 Typické průběhy proudu a momentu pro obecný asynchronní motor a pro odstředivý ventilátor [3]



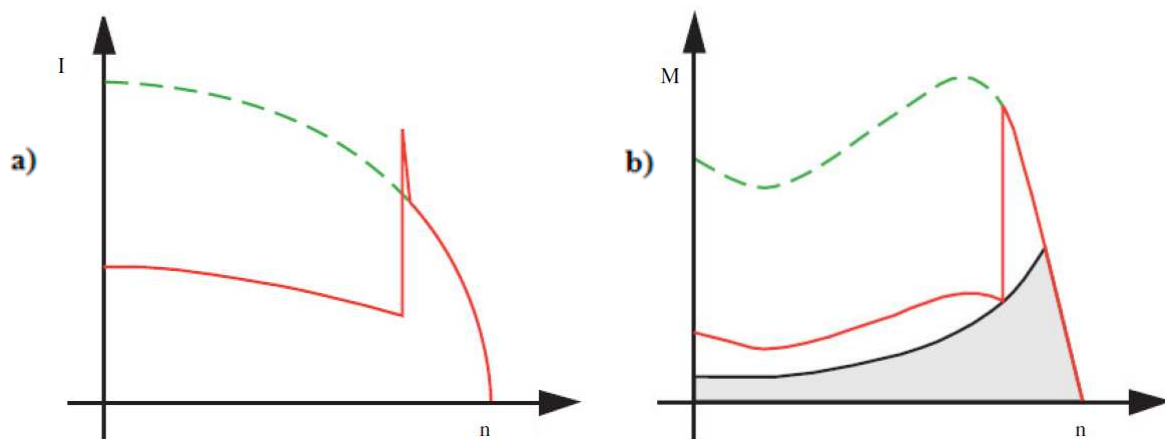
Obr. 4 - Typické průběhy pro obecný asynchronní motor

- a) průběh proudu
- b) průběh momentu



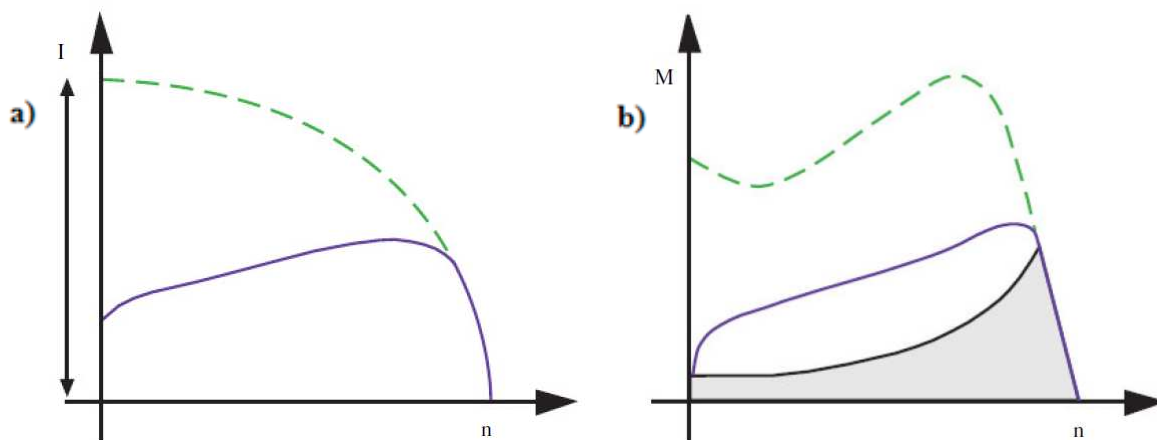
Obr. 5 - Typické průběhy pro odstředivý ventilátor při přímém připojení na síť

- a) průběh proudu
b) průběh momentu



Obr. 6 - Typické průběhy pro odstředivý ventilátor při přepínání hvězda - trojúhelník

- a) průběh proudu
b) průběh momentu



Obr. 7 - Typické průběhy pro odstředivý ventilátor při napojení ze softstartéru

- a) průběh proudu
b) průběh momentu

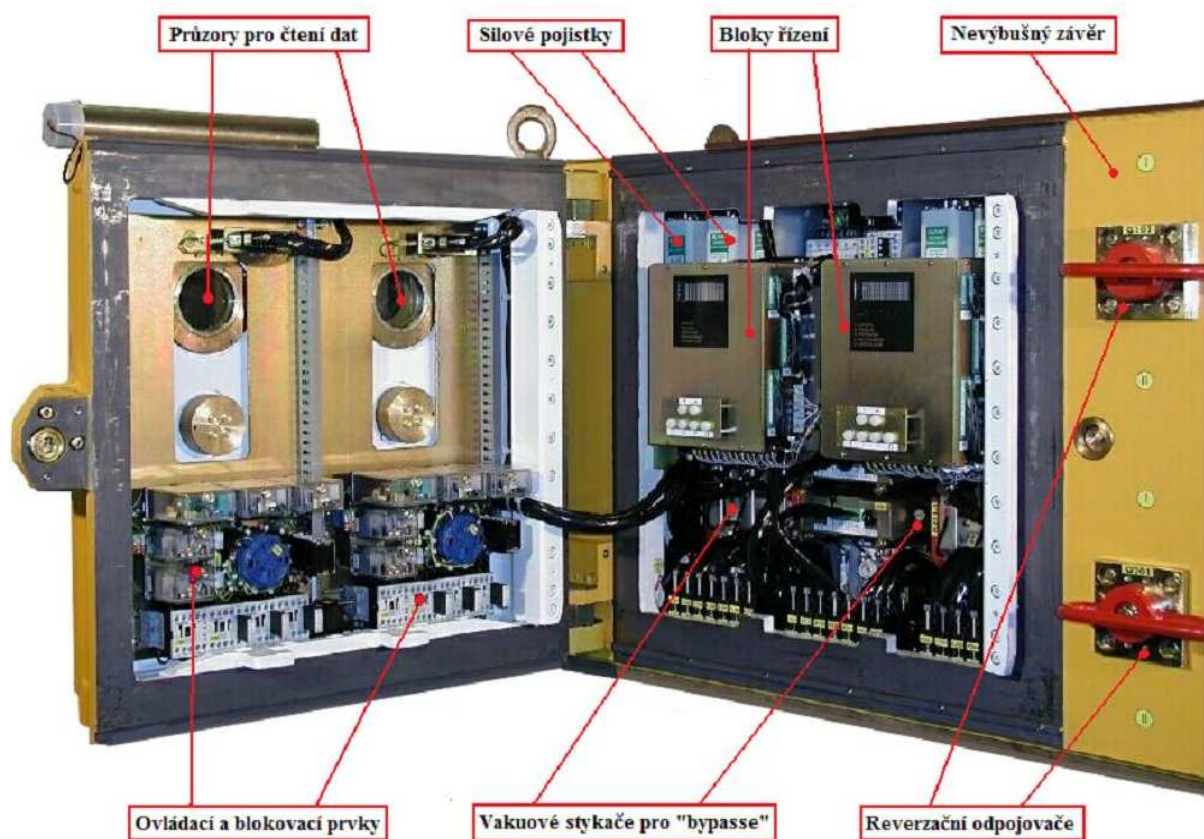
1.7 Princip činnosti softstartéru [1], [3], [10]

Softstartér je zařízení určené k plynulému rozběhu příp. doběhu asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Při tomto způsobu řízení dochází k omezení proudových a momentových rázů. Výhodou zmíněného softstartéru je skutečnost, že pomocí vhodného nastavení parametrů lze dosáhnout sníženého rozběhového proudu motoru a možnost jeho řízení po celou dobu rozběhu. Plynulý rozběh motoru je ve většině případů dosažen řízením napájecího napětí na vstupních svorkách motoru. Napájecí frekvence přitom zůstává nezměněná. Samotná regulace je v tomto případě napěťová, tzn. že řídicí logika softstartéru postupně redukuje (zvyšuje nebo snižuje) napájecí napětí, a to po určenou nastavenou dobu.

Využívá se principu, kdy napětí na svorkách motoru je během rozběhu (příp. doběhu) sníženo a tím je nižší i rozběhový proud a také moment. Postupným zvyšováním nebo snižováním napětí dochází k postupnému zvětšení příp. snížení proudu a momentu na hřídeli motoru a v omezené míře také jeho otáček.

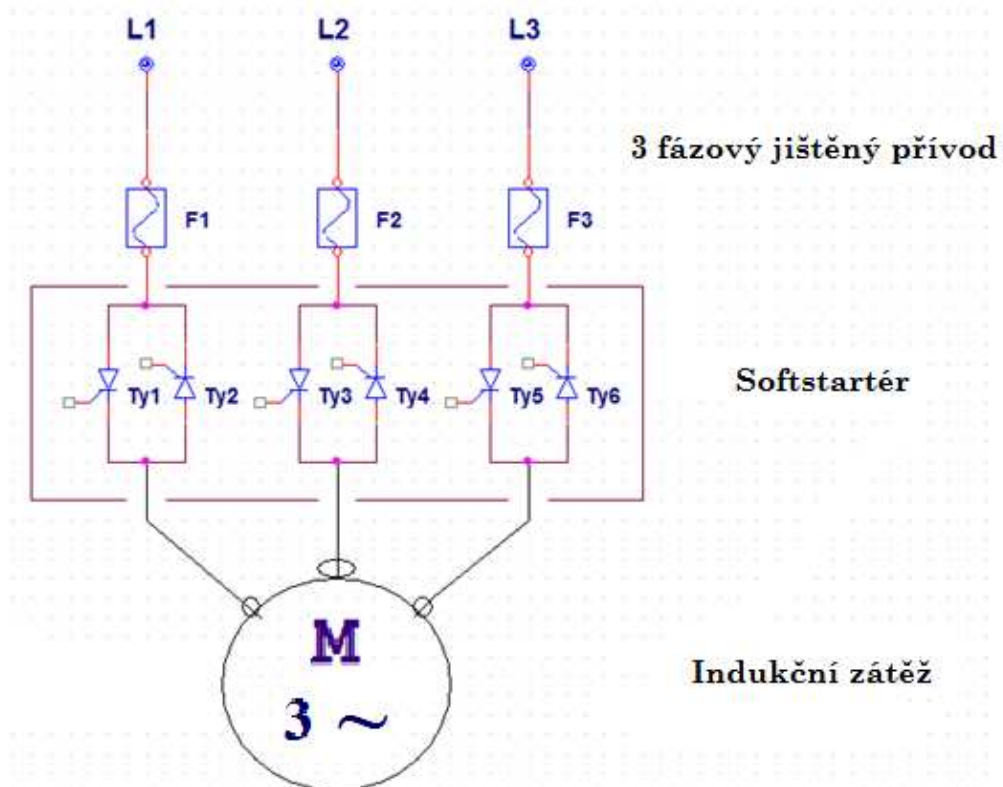
Softstartér pro trojfázový motor je řešen pomocí antiparalelně zapojených fázově řízených tyristorů, které jsou řazeny ve dvojici pro každou fázi příp. v úsporném zapojení pouze pro dvě fáze. Jsou možné dva způsoby spojení softstartéru s AM (zapojení v sérii s motorem nebo zapojení uvnitř trojúhelníku motoru). Snížení napětí na motoru vede ke kvadratickému snížení točivého momentu ve vztahu k normálnímu spouštěcímu momentu motoru. Softstartéry jsou tedy vhodné zejména ke spouštění zátěží, jejichž křivku rychlosti nebo točivého momentu lze vyjádřit kvadratickou funkcí (například čerpadla nebo ventilátory). Po ukončení rozběhu motoru je možno softstartér přemostit stykačem (tzv. bypasse), čímž se omezí elektromagnetické rušení a výkonové ztráty. Počet pólů motoru taktéž výrazně ovlivňuje jeho technické parametry. Motor s dvěma póly má nižší počáteční kroutící moment než motor se čtyřmi a více póly.

1.8 Softstartér v nevýbušném provedení

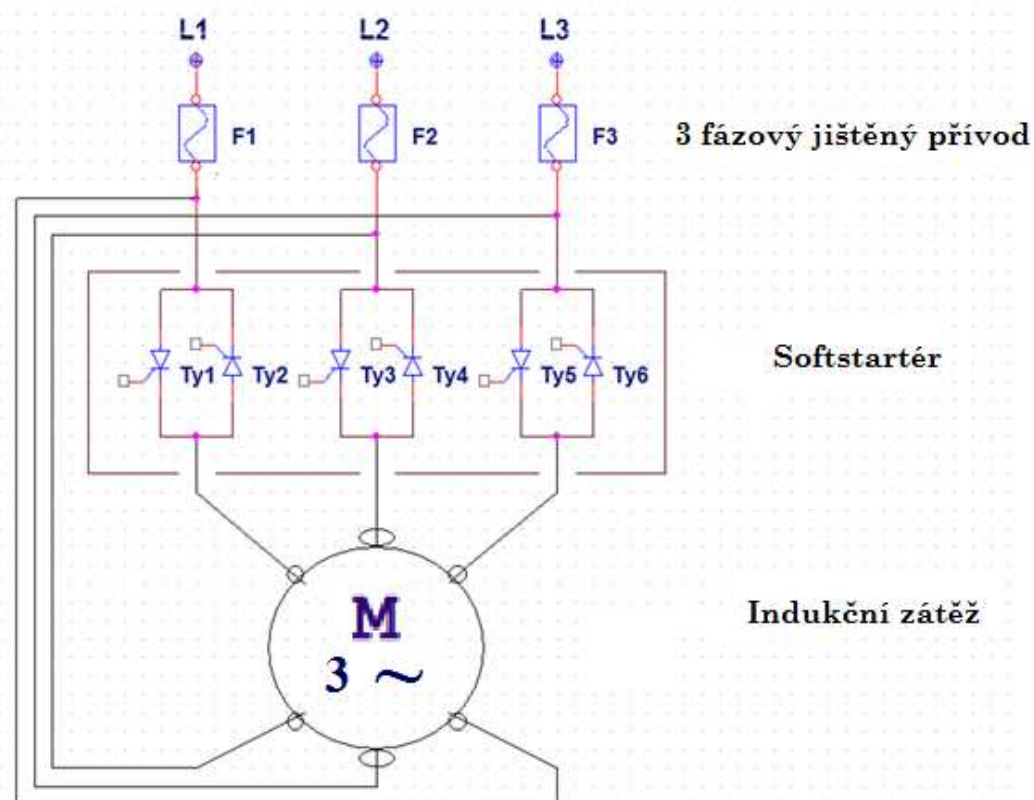


Obr. 8 – Popis vybavení softstartéru v nevýbušném závěru

1.9 Základní způsoby připojení softstartéru k asynchronnímu motoru



Obr. 9a - Zapojení softstartéru v přívodu motoru



Obr. 9b - Zapojení softstartéru uvnitř trojúhelníku

2 Matematický a simulační model asynchronního motoru napájeného ze softstartéru

2.1 Odvození Klossova vztahu, vztahy pro výpočet statorového proudu [1], [5], [7], [9], [10]

Základní vztah pro moment asynchronního motoru

$$M = \frac{P_{\sigma}}{\omega_0} \quad (1)$$

Po zanedbání ztrát ve statoru

$$P_{\sigma} = P_1 \quad (2)$$

Skluz

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (3a) \quad (3b)$$

Jmenovitý skluz

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \quad (4)$$

Synchronní otáčky

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_n}{p} \quad (5)$$

Synchronní úhlová rychlost

$$\omega_0 = \frac{60 \cdot f_n}{9,55 \cdot p} \quad \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (6a) \quad (6b)$$

Ztráty v rotoru

$$P_{Cu2} = P_{\sigma} - P_m = M \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \omega_0 = M \cdot s \cdot \omega_0 = P_{\sigma} \cdot s$$
$$P_{Cu2} = P_{\sigma} \cdot s = P_j \quad (7)$$

Mechanický výkon motoru

$$P_m = P_{\sigma} - P_j = P_{\sigma} - (P_{\sigma} \cdot s) = P_{\sigma} \cdot (1 - s) \quad (8)$$

Joulové ztráty 3-fázového motoru

$$P_j = 3 \cdot R_{21} \cdot I_{21}^2 \quad (9)$$

Proud rotoru přepočítaný na stator

$$I_{21} = \frac{U_1}{\sqrt{\left[\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 21})^2 \right]}} \quad (10)$$

Pomocné vztahy

$$\frac{R_{21}}{s} = R_{21} + R_{21} \cdot \frac{1-s}{s} \quad (11)$$

$$X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 21} \quad (12)$$

Moment na hřídeli motoru

$$M = \frac{P_\sigma}{\omega_0} = \frac{P_j}{\omega_0 \cdot s} = \frac{3 \cdot R_{21} \cdot I_{21}}{\omega_0 \cdot s} = \frac{3 \cdot R_{21} \cdot U_1^2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]} \quad (13)$$

Skluz zvratu (při maximálním momentu M_{\max} je skluz zvratu s_{zv})

$$s_{zv} = \frac{R_{21}}{\sqrt{(R_1^2 + X_k^2)}} \quad (14)$$

Po zanedbání odporu vinutí statoru R_1

Skluz zvratu

$$s_{zv} = \frac{R_{21}}{X_k} \quad (15)$$

Maximální moment (moment zvratu)

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot U_f^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot X_k} \quad (16)$$

Po postupných úpravách předchozích vztahů dostaneme zjednodušený Klossův vztah

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (17)$$

Maximální moment pro jmenovitou hodnotu napájecího napětí

$$M_{\max n} = \frac{M_{\max n}}{M_n} \cdot M_n = q_m \cdot M_n \quad (18)$$

Skluz zvratu pro jmenovitou hodnotu napájecího napětí

$$s_{zvn} = s_n \cdot \left(q_m + \sqrt{q_m^2 - 1} \right) \quad (19)$$

Maximální moment pro aktuální hodnotu napájecího napětí a kmitočtu

$$M_{\max} = M_{\max n} \cdot (k_u)^2 \cdot \left(\frac{f_n}{f_s} \right)^2 = M_{\max n} \cdot \left(\frac{U_s}{U_n} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_n}{f_s} \right)^2 \text{ kde } k_u = \frac{U_s}{U_n} \quad (20)$$

Skluz zvratu pro aktuální hodnotu kmitočtu

$$s_{zv} = s_{zvn} \cdot \left(\frac{f_n}{f_s} \right) \quad (21)$$

(v této práci je používán konstantní kmitočet $f = 50 \text{ Hz} \Rightarrow \left(\frac{f_n}{f_s} \right) = 1$)

Vztahy pro výpočet statorového proudu (se zanedbáním odporu vinutí statoru R_l)

Příklad řešení dle vektorového diagramu pro napětí a proudy

Proud rotoru (při skluzu $s = 1$ tj. motor nakrátko)

$$I_{2k} = \frac{k_u \cdot U_n}{\sqrt{(R_{21})^2 + \left(\frac{R_{21}}{s_{zv}}\right)^2}} = \frac{U_s}{\sqrt{(R_{21})^2 + (X_k)^2}} \quad (22)$$

Proud rotoru (při skluzu s)

$$I_{2s} = \frac{U_s}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s}\right)^2 + (X_k)^2}} = \frac{U_s}{\sqrt{\left(\frac{R_{21}}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_{21}}{s_{zv}}\right)^2}} = I_{2k} \cdot \sqrt{\frac{s^2 + (s \cdot s_{zv})^2}{s^2 + (s_{zv})^2}} \quad (23)$$

Proud naprázdno (blízký proudu magnetizačnímu)

$$I_0 = I_{ln} \cdot \left(\sin \varphi_1 - \left(\cos \varphi_1 \cdot \frac{s_n}{s_{zv}} \right) \right) \quad (24)$$

Pomocné vztahy

$$\sin \varphi_1 = \sqrt{1 - (\cos \varphi_1)^2} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_2 &= \frac{R_{21}}{\sqrt{(R_{21})^2 + s^2 \cdot (X_k)^2}} = \frac{R_{21}}{\sqrt{(R_{21})^2 + s^2 \cdot \left(\frac{R_{21}}{s_{zv}}\right)^2}} = \frac{R_{21}}{\sqrt{\frac{(R_{21})^2 \cdot (s_{zv})^2 + s^2 \cdot (R_{21})^2}{(s_{zv})^2}}} = \\ &= \frac{R_{21}}{\sqrt{\frac{(R_{21})^2 \cdot ((s_{zv})^2 + s^2)}{(s_{zv})^2}}} = \frac{(R_{21})^2}{(R_{21})^2 \cdot ((s_{zv})^2 + s^2)} = \frac{(R_{21})^2 \cdot (s_{zv})^2}{(R_{21})^2 \cdot ((s_{zv})^2 + s^2)} = \sqrt{\frac{(s_{zv})^2}{(s_{zv})^2 + s^2}} \\ \cos \varphi_2 &= \sqrt{\frac{(s_{zv})^2}{(s_{zv})^2 + s^2}} \quad (26) \end{aligned}$$

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - (\cos \varphi_2)^2} \quad (27)$$

Proud statoru

$$I_{1s} = \sqrt{(I_0 + (I_{2s} \cdot \sin \varphi_2))^2 + (I_{2s} \cdot \cos \varphi_2)^2} \quad (28)$$

2.2 Způsoby řízení rozběhu asynchronního motoru pomocí softstartéru [1]

U softstartéru (někdy také publikován jako zařízení „měkkého startování“) se užívají dva základní druhy řízení, a to řízení velikostí výstupního napětí a řízení výstupního proudu.

1) Programové zvyšování napětí

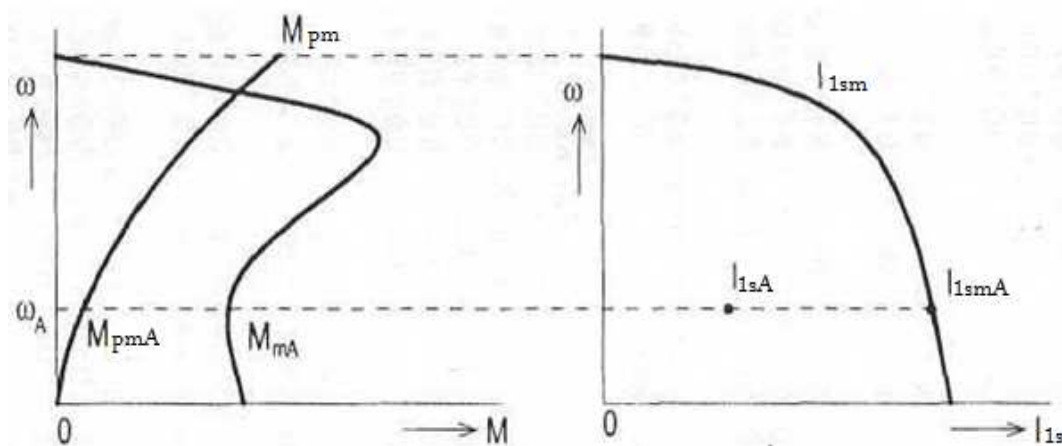
Nastaví se základní napětí U_0 a doba rozběhu T_{roz} . Napětí U_0 se volí z požadavku na záběrný proud (tento proud je přímo úměrný napětí).

Tento způsob řízení bude základem další části této práce.

Moment motoru M

$$M(\omega, t) = M_m(\omega) \cdot \left(\frac{U_s}{U_n} \right)^2 \quad (29)$$

kde $M_m(\omega)$ je velikost momentu na přirozené charakteristice při úhlové rychlosti ω



Obr. 10 - Přirozené charakteristiky motoru - momentová $\omega(M)$, zatěžovací $\omega(M_{pm})$, proudová $\omega(I_{sm})$

Moment motoru ve zvoleném bodě A

$$M_A = M_{mA} \cdot \left(\frac{U_{sA}}{U_n} \right)^2 \quad (30)$$

Je to hodnota momentu v okamžiku, kdy bylo dosaženo úhlové rychlosti ω_A . Tedy moment motoru na přirozené charakteristice $M_{mA} = M_m(\omega_A)$ v okamžiku t_A při napětí $U_{sA} = U_s(t_A)$.

Rozběh je popsán pohybovou rovnicí

$$M - M_{pm} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (31)$$

Moment M je funkcí dvou proměnných, úhlové rychlosti ω a času t . M_{pm} je moment pracovního mechanismu a je převážně funkcí úhlové rychlosti (ω). Průběh veličin při rozběhu lze zjistit řešením soustavy rovnic (30) a (31), pro které je dán průběh $U_{roz}(t)$ a přirozená charakteristika $\omega(M)$ příp. $M(\omega)$.

Dále je nutno zjistit, zda se při rozběhu nepřekročil přípustný proud. Pro tento účel se proto využije přirozená charakteristika $\omega(I_{1sm})$, obr. 10. Každé úhlové rychlosti ω odpovídá snížené napětí U_s a proud I_{1sm} na přirozené charakteristice. Pro libovolnou úhlovou rychlost můžeme tedy určit proud statoru AM.

Proud statoru I_{1s}

$$I_{1s}(\omega, t) = I_{1sm}(\omega) \cdot \left(\frac{U_s}{U_n} \right) \quad (32)$$

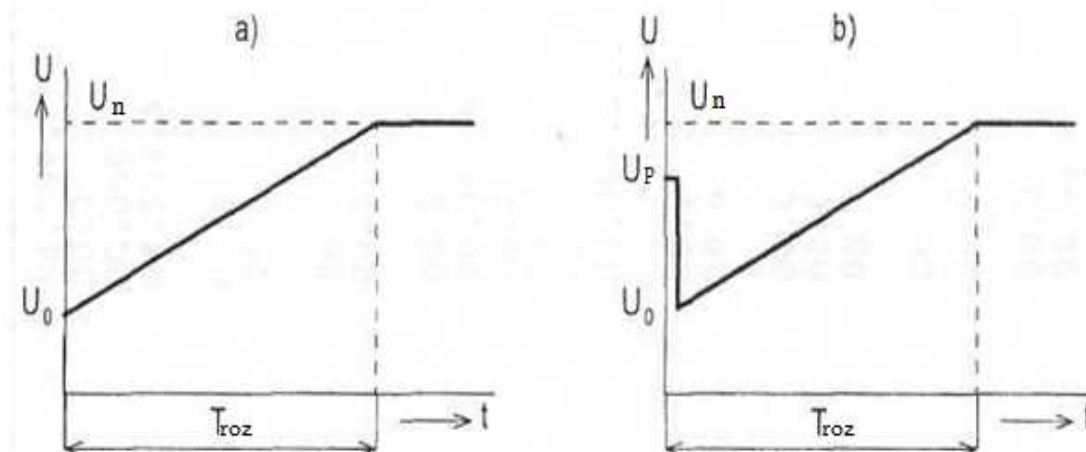
kde $I_{1sm}(\omega)$ je velikost proudu na přirozené charakteristice při úhlové rychlosti ω

Proud statoru motoru ve zvoleném bodě A

$$I_{sA} = I_{smA} \cdot \left(\frac{U_{sA}}{U_n} \right) \quad (33)$$

Je to hodnota proudu v okamžiku, kdy bylo dosaženo rychlosti ω_A . Tedy proud statoru na přirozené charakteristice $I_{smA} = I_{sm}(\omega_A)$ v okamžiku t_A při napětí $U_{sA} = U_s(t_A)$.

Pro začátek rozběhu bývá třeba větší, tzv. moment na „utržení“. Proto se někdy průběh napětí $U_s(t)$ upravuje podle obr. 11b). Jedná se v tomto případě o tzv. kick-start.



Obr. 11 - Průběhy napětí rozběhové rampy pro asynchronní motor

2) Při rozběhu se reguluje velikost rozběhového proudu.

Rozběhový měnič střídavého napětí je opatřen čidlem proudu a programem řídicího počítače je realizován regulátor proudu. Jde tedy o zařízení dokonalejší, rozsáhlejší a nákladnější. Tento druh řízení přesahuje rámec této bakalářské práce.

2.3 Specifikace základních parametrů průběhů výstupních napětí ze softstartéru (vstupních napětí pro motor) a průběhů momentů pracovního mechanismu

Pro průběh výstupních napětí ze softstartéru (rozběhové rampy) byly pro oba AM zvoleny celkem čtyři varianty (obr. 16, obr. 39)

- varianta označena *Us-1*: průběh výstupního napětí s nulovým základním napětím U_0 a dobou rozběhu $T_{roz} = 8$ s
- varianta označena *Us-2*: průběh výstupního napětí se základním napětím $U_0 = 30\%$ napájecího napětí a dobou rozběhu $T_{roz} = 5$ s
- varianta označena *Us-3*: průběh výstupního napětí se základním napětím $U_0 = 50\%$ napájecího napětí a dobou rozběhu $T_{roz} = 3$ s
- varianta označena *Us-4*: průběh výstupního napětí, kde byla zvolena plná hodnota napájecího napětí (softstartér pracující v režimu „bypass“), a to z důvodu názorného porovnání jednotlivých průběhů při simulaci pro plné napájecí napětí a pro jednotlivé rozběhové rampy softstartéru

Pro průběh momentů pracovního mechanismu (zatěžovací momenty) byly pro oba AM zvoleny celkem tři varianty (obr. 17, obr. 40)

- varianta označena *Mpm-1*: průběh s nulovou hodnotou momentu pracovního mechanismu $Mpm-1 = 0$ Nm (nezatížený pohon)
- varianta označena *Mpm-2*: průběh momentu pracovního mechanismu $Mpm-2 = 60$ Nm pro motor č. 1 a $Mpm-2 = 600$ Nm pro motor č. 2 (tzv. výtahová charakteristika)
- varianta označena *Mpm-3*: průběh momentu pracovního mechanismu $Mpm-3 = (0,004 \cdot \omega^2)$ Nm pro motor č. 1 a $Mpm-3 = (0,04 \cdot \omega^2)$ Nm pro motor č. 2 (tzv. ventilátorová charakteristika)

2.4 Řešení simulačního modelu asynchronního motoru č. 1, u kterého není od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky

2.4.1 Parametry asynchronního motoru č. 1

Typ asynchronního motoru: **AOM 180L**

Tab. 1 - Parametry simulovaného asynchronního motoru č. 1 předložené výrobcem [2]

Název parametru	Označení	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý činný výkon	P_n	[kW]	22
Jmenovité statorové napětí	U_n	[V]	400
Jmenovité otáčky	n	[ot/min]	1460
Účinník	$\cos\varphi$	[-]	0,87
Účinnost	η	[%]	90,7
Jmenovitý proud	I_n	[A]	40
Jmenovitá frekvence	f_n	[Hz]	50
Počet pólových dvojic	p	[-]	2
Jmenovitý moment	M_n	[Nm]	144
Poměr max. moment/jmenovitý moment (tzv. momentová přetížitelnost)	M_{max}/M_n (q_m)	[-]	2,5
Poměr záběrný moment/jmenovitý moment	M_{zab}/M_n	[-]	2,3
Poměr záběrný proud/jmenovitý proud	I_{zab}/I_n	[-]	7,3
Moment setrvačnosti celkový	J_c	[kgm ²]	0,164

2.4.2 Výpočet dalších potřebných parametrů pro motor č. 1

Jmenovitý skluz

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \quad (34a)$$

$$s_n = \frac{1500 - 1460}{1500} = \underline{\underline{0,0267}} \quad (34b)$$

Skluz zvratu (pro kmitočty $f = \text{konst.}$)

$$s_{zv} = s_{zv} = s_n \cdot \left(q_m + \sqrt{q_m^2 - 1} \right) \quad (35a)$$

$$s_{zv} = 0,0267 \cdot \left(2,5 + \sqrt{(2,5)^2 - 1} \right) = \underline{\underline{0,128}} \quad (35b)$$

Reaktance vinutí nakrátko

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot U_f^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot X_k} \Rightarrow X_k = \frac{3 \cdot U_f^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\max}} \quad \text{kde } U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (36a)$$

$$X_k = \frac{3 \cdot 230^2}{2 \cdot 157 \cdot (144 \cdot 2,5)} = \underline{\underline{1,404 \, \Omega}} \quad (36b)$$

Odpor vinutí rotoru přepočtený na stator

$$s_{zv} = \frac{R_{21}}{X_k} \Rightarrow R_{21} = s_{zv} \cdot X_k \quad (37a)$$

$$R_{21} = 0,128 \cdot 1,404 = \underline{\underline{0,179 \, \Omega}} \quad (37b)$$

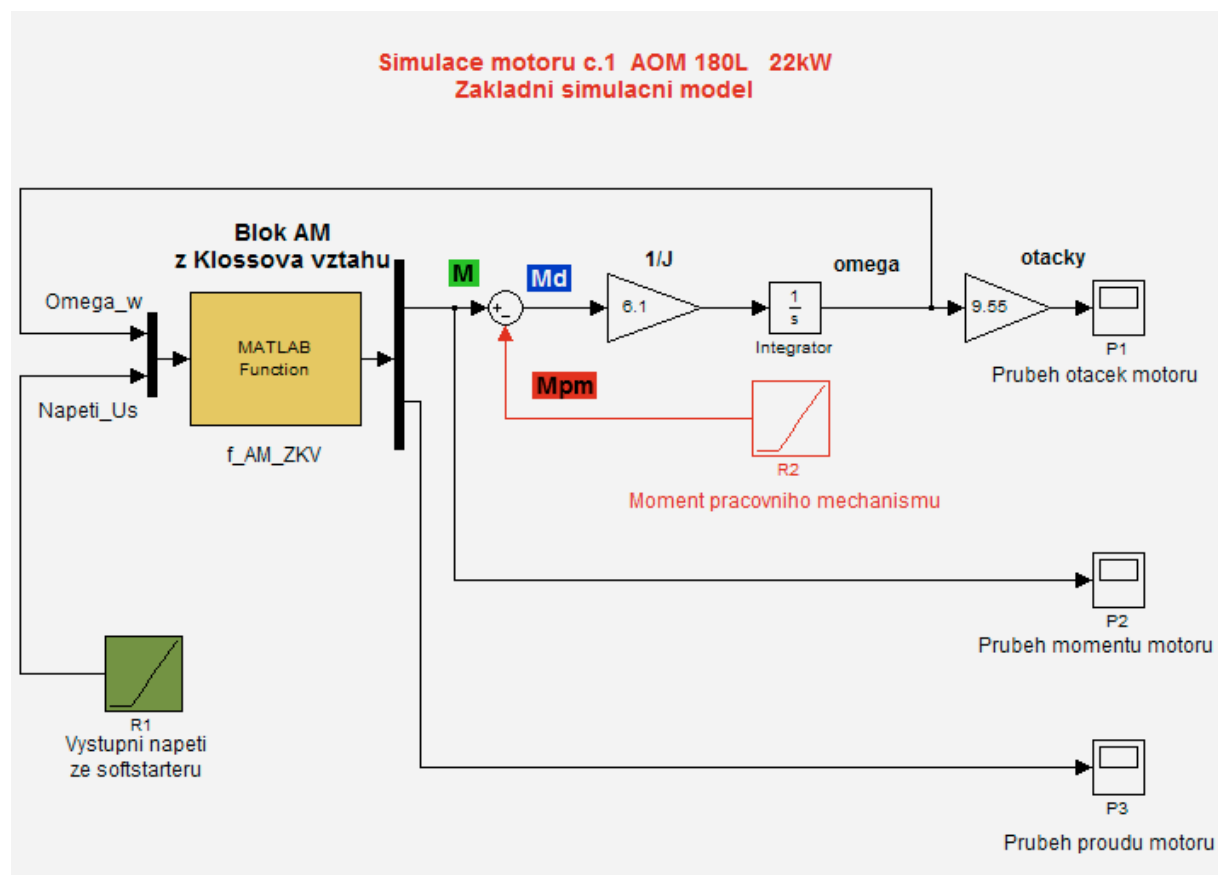
Proud naprázdno

$$I_0 = I_{ln} \cdot \left(\sin \varphi_1 - \left(\cos \varphi_1 \cdot \frac{s_n}{s_{zv}} \right) \right) \quad (38a)$$

$$I_0 = 40 \cdot \left(0,493 - \left(0,87 \cdot \frac{0,0267}{0,128} \right) \right) = \underline{\underline{12,4 \, A}} \quad (38b)$$

2.4.3 Základní simulační model asynchronního motoru č. 1

Tento základní simulační model motoru č. 1 (obr. 12) byl sestaven v Simulinku na základě rozboru matematického modelu motoru se zanedbáním elektromagnetických dějů s řešením momentu motoru pomocí Klossova vztahu a řešením statorového proudu (který v sobě zahrnuje i proud naprázdno) s pomocí předložených parametrů motoru (tab. 1) a vypočtených parametrů motoru (kap. 2.3.2)



Obr. 12 - Základní simulační model asynchronního motoru č. 1

2.5 Řešení simulačního modelu asynchronního motoru č. 2, u kterého je od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky

2.5.1 Parametry asynchronního motoru č. 2

Typ asynchronního motoru: **SP1 355M-4**

Tab. 2 - Parametry simulovaného asynchronního motoru č. 2 předložené výrobcem [4]

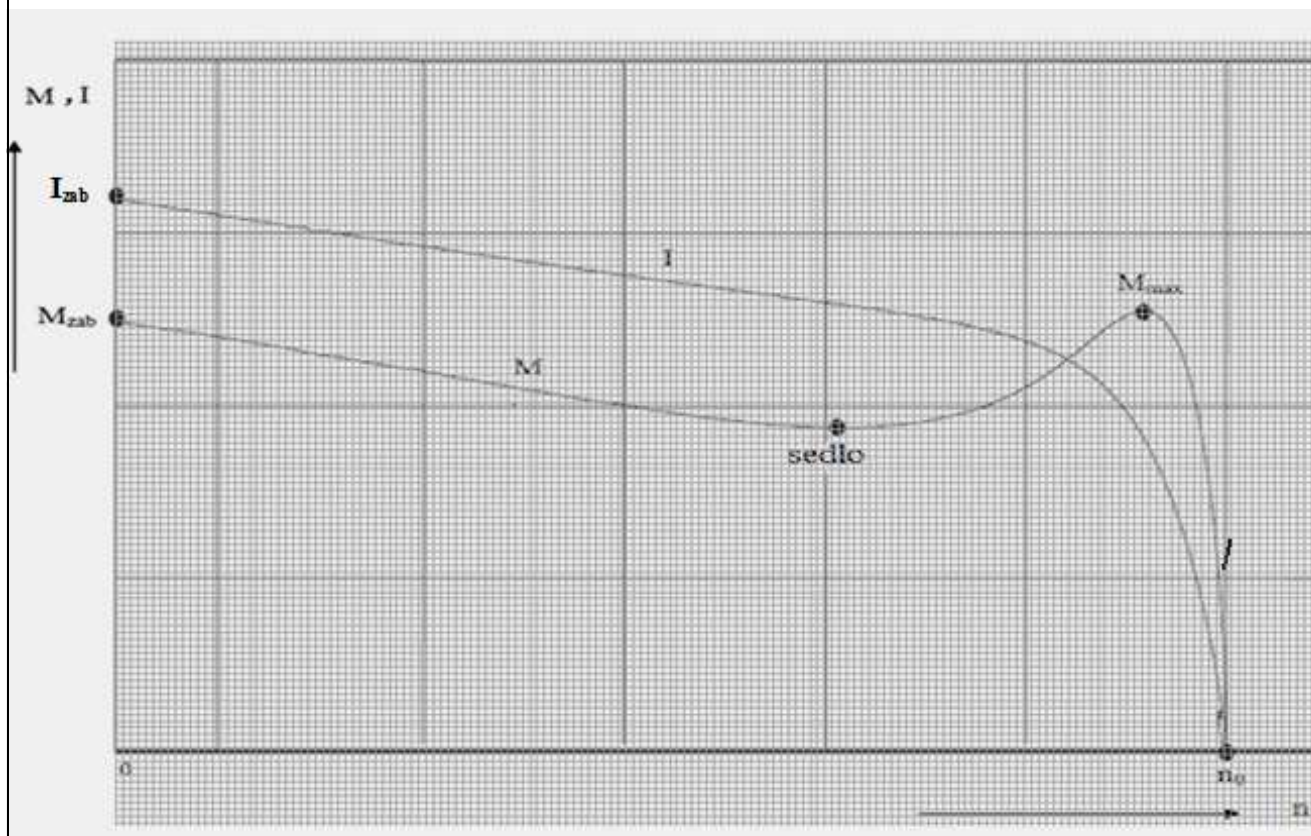
Název parametru	Označení	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý činný výkon	P_n	[kW]	250
Jmenovité statorové napětí	U_n	[V]	1000
Jmenovité otáčky	n_n	[ot/min]	1475
Účinník	$\cos\varphi$	[-]	0,88
Účinnost	η	[%]	94,5
Jmenovitý proud	I_n	[A]	175
Jmenovitá frekvence	f_n	[Hz]	50
Počet pólových dvojic	p	[-]	2
Jmenovitý moment	M_n	[Nm]	1619
Poměr max. moment/jmenovitý moment (tzv. momentová přetížitelnost)	M_{max}/M_n (q_m)	[-]	2,5
Poměr záběrný moment/jmenovitý moment	M_{zab}/M_n	[-]	2,4
Poměr záběrný proud/jmenovitý proud	I_{zab}/I_n	[-]	7,0
Moment setrvačnosti celkový	J_c	[kgm ²]	6,0

Změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky od výrobce (obr. 13a, obr. 13b) byl předložen pouze v základním tvaru bez měřítek na jednotlivých osách a uvedení základních jednotek. Bylo proto nutno použít potřebné tabulkové parametry motoru (M_n , M_{max} , M_{zab}/M_n , I_{zab} , I_n , n_n), zpracovat grafické vyjádření těchto charakteristik tak, aby bylo možno na nich odečítat jednotlivé hodnoty v daném měřítku a co nejpřesněji zrekonstruovat jak momentovou tak proudovou charakteristiku daného motoru v tabulkovém kalkulátoru Excel (obr. 14a, obr. 14b) a dále tyto charakteristiky v programu Matlab - Simulink zpracovat.

2.5.2 Změřená zadaná momentová a proudová charakteristika motoru č. 2 od výrobce

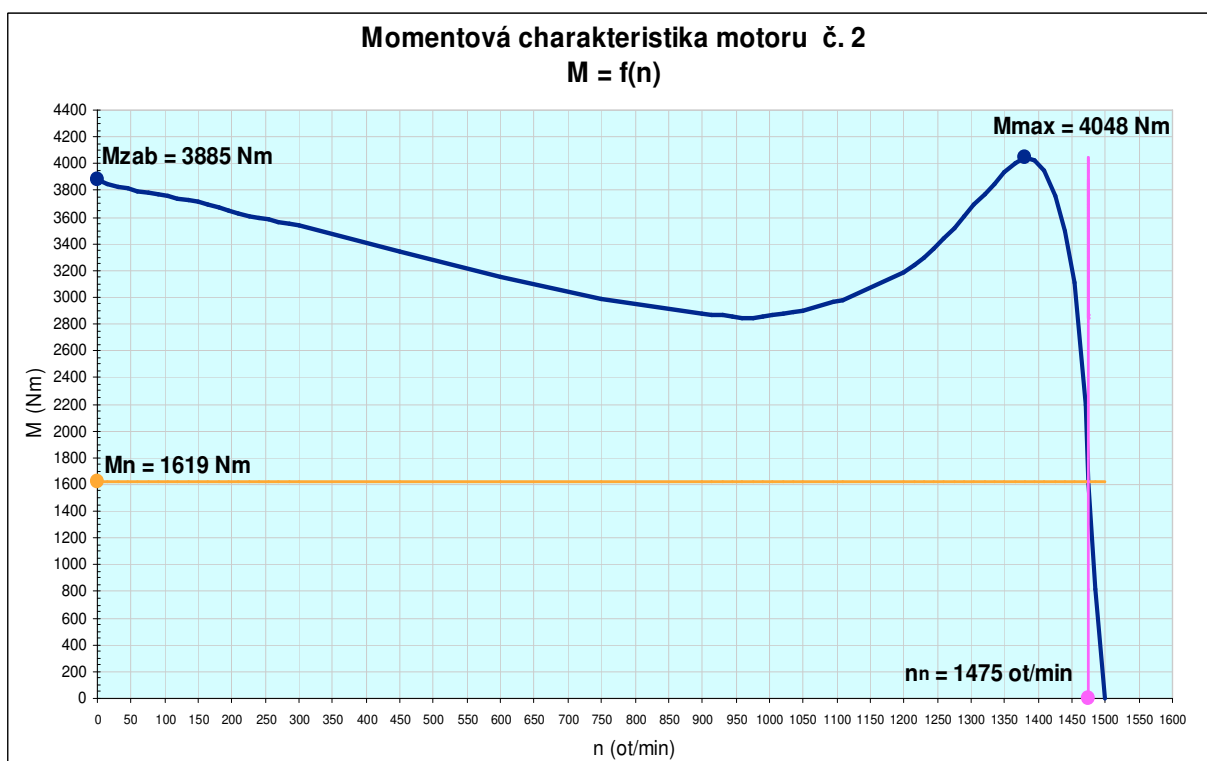


Obr. 13a - Základní tvar momentové a proudové charakteristiky motoru č. 2 od výrobce [4]

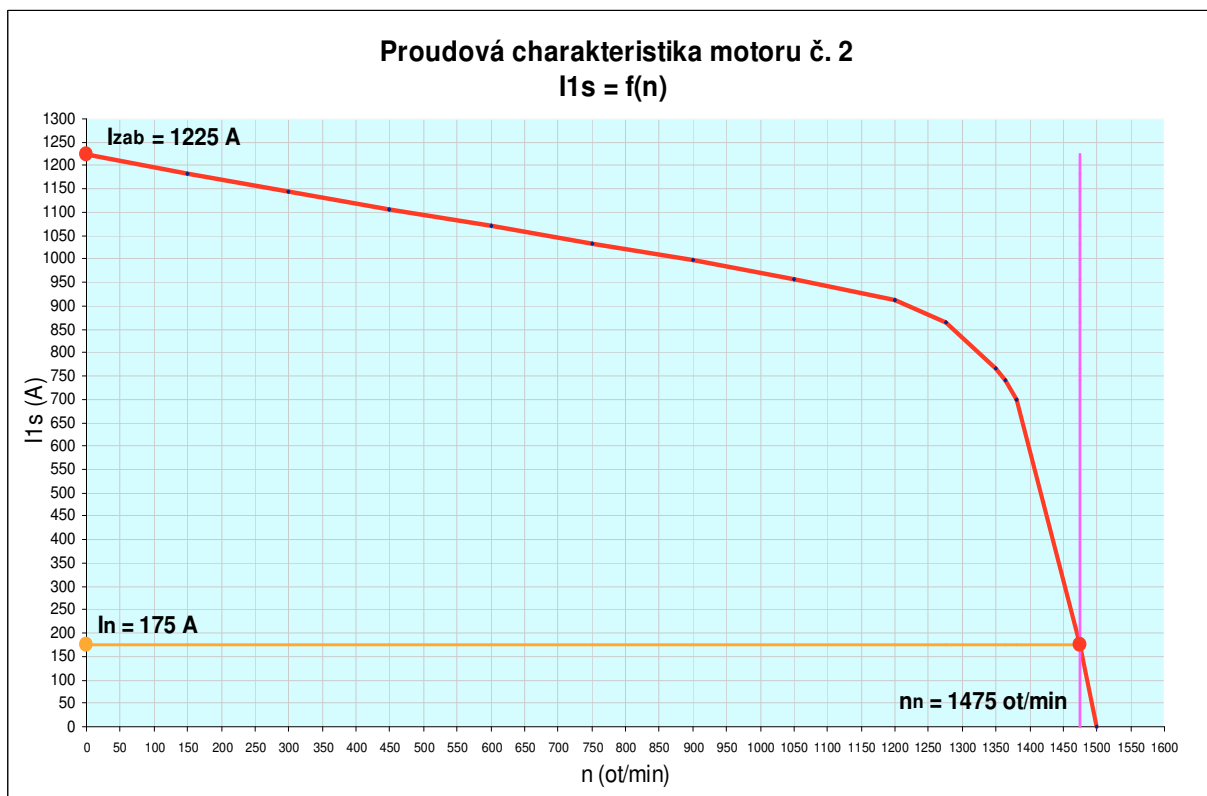


Obr. 13b - Momentová a proudová charakteristika motoru č. 2 s mřížkou pro odečet hodnot

2.5.3 Zrekonstruovaná momentová a proudová charakteristika motoru č. 2



Obr. 14a - Zrekonstruovaná momentová charakteristika motoru č. 2 od výrobce

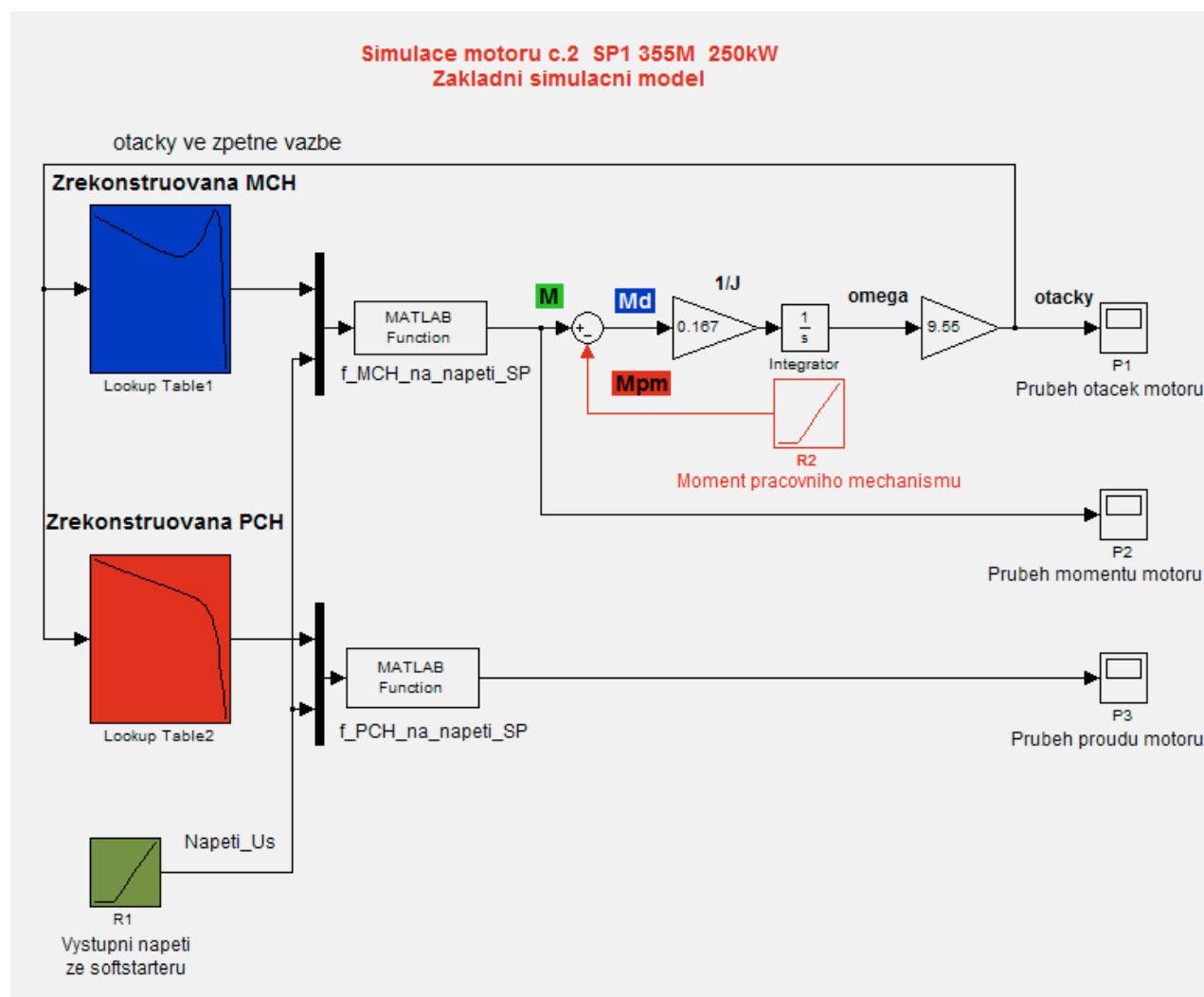


Obr. 14b - Zrekonstruovaná proudová charakteristika motoru č. 2 od výrobce

2.5.4 Základní simulační model asynchronního motoru č. 2

Tento základní simulační model motoru č. 2 (obr. 15) byl sestaven v programu Matlab - Simulink na základě změřeného zadaného průběhu momentové a proudové charakteristiky od výrobce (obr. 13a, obr. 13b), jejich zrekonstruovaného průběhu pomocí tabulkového kalkulátoru Excel (obr. 14a, obr. 14b) a matematického modelu asynchronního motoru v základní verzi.

Na základě výše uvedených podkladů je možno provádět vlastní analýzu vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru.



Obr. 15 - Základní simulační model asynchronního motoru č. 2

2.5.5 Příklady výpočtů momentů a proudů pro oba asynchronní motory

Výpočty budou u obou motorů řešeny pro $s = 1$ (motor nakrátko) $\Rightarrow M = M_{zab}, I_{1s} = I_{zab}$

Asynchronní motor č. 1:

Moment motoru - pomocné vztahy (18), (19), (20), (21), (34a), (35a)

$$M = M_{zab} = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (39)$$

Proud motoru - pomocné vztahy (22), (23), (24), (25), (26), (27), (34a), (35a), (38a)

$$I_{1s} = I_{zab} = \sqrt{(I_0 + (I_{2s} \cdot \sin \varphi_2))^2 + (I_{2s} \cdot \cos \varphi_2)^2} \quad (40)$$

Moment motoru pro výstupní napětí 400 V ze softstartéru

$$M_{zab} = \frac{720}{7,94} = \underline{\underline{90,68 \text{ Nm}}} \quad (41)$$

Moment motoru pro výstupní napětí 200 V ze softstartéru ($U_0 = 50 \%$ napájecího napětí)

$$M_{zab} = \frac{180}{7,94} = \underline{\underline{22,67 \text{ Nm}}} \quad (42)$$

Moment motoru pro výstupní napětí 120 V ze softstartéru ($U_0 = 30 \%$ napájecího napětí)

$$M_{zab} = \frac{64,8}{7,94} = \underline{\underline{8,16 \text{ Nm}}} \quad (43)$$

U tohoto AM je při řešení vztahu pro výpočet proudu statoru I_{1s} zahrnut i proud naprázdno $I_0 = 12,4 \text{ A}$.

Proud motoru pro výstupní napětí 400 V ze softstartéru

$$I_{zab} = \sqrt{(12,4 + 280,43)^2 + (1150,57)^2} = \underline{\underline{294,79 \text{ A}}} \quad (44)$$

Proud motoru pro výstupní napětí 200 V ze softstartéru ($U_0 = 50 \%$ napájecího napětí)

$$I_{zab} = \sqrt{(12,4 + 140,21)^2 + (322,21)^2} = \underline{\underline{153,66 \text{ A}}} \quad (45)$$

Proud motoru pro výstupní napětí 120 V ze softstartéru ($U_0 = 30 \%$ napájecího napětí)

$$I_{zab} = \sqrt{(12,4 + 84,127)^2 + (10,69)^2} = \underline{\underline{97,11 \text{ A}}} \quad (46)$$

Asynchronní motor č. 2:

Moment motoru ze zrekonstruované MCH pro výstupní napětí 1000 V ze softstartéru

$$M_{zab} = M_{MCH} = \underline{\underline{3885 \text{ Nm}}} \quad (47)$$

Moment motoru pro výstupní napětí 500 V ze softstartéru ($U_0 = 50 \%$ napájecího napětí)

$$M_{zab} = M_{MCH} \cdot (k_u)^2 = 3885 \cdot (0,5)^2 = \underline{\underline{971,25 \text{ Nm}}} \quad (48)$$

Moment motoru pro výstupní napětí 300 V ze softstartéru ($U_0 = 30 \%$ napájecího napětí)

$$M_{zab} = M_{MCH} \cdot (k_u)^2 = 3885 \cdot (0,3)^2 = \underline{\underline{349,65 \text{ Nm}}} \quad (49)$$

Proud motoru ze zrekonstruované PCH pro výstupní napětí 1000 V ze softstartéru

$$I_{zab} = I_{1sPCH} = \underline{\underline{1225 \text{ A}}} \quad (50)$$

Proud motoru pro výstupní napětí 500 V ze softstartéru ($U_0 = 50 \%$ napájecího napětí)

$$I_{zab} = I_{1sPCH} \cdot k_u = 1225 \cdot 0,5 = \underline{\underline{612,5 \text{ A}}} \quad (51)$$

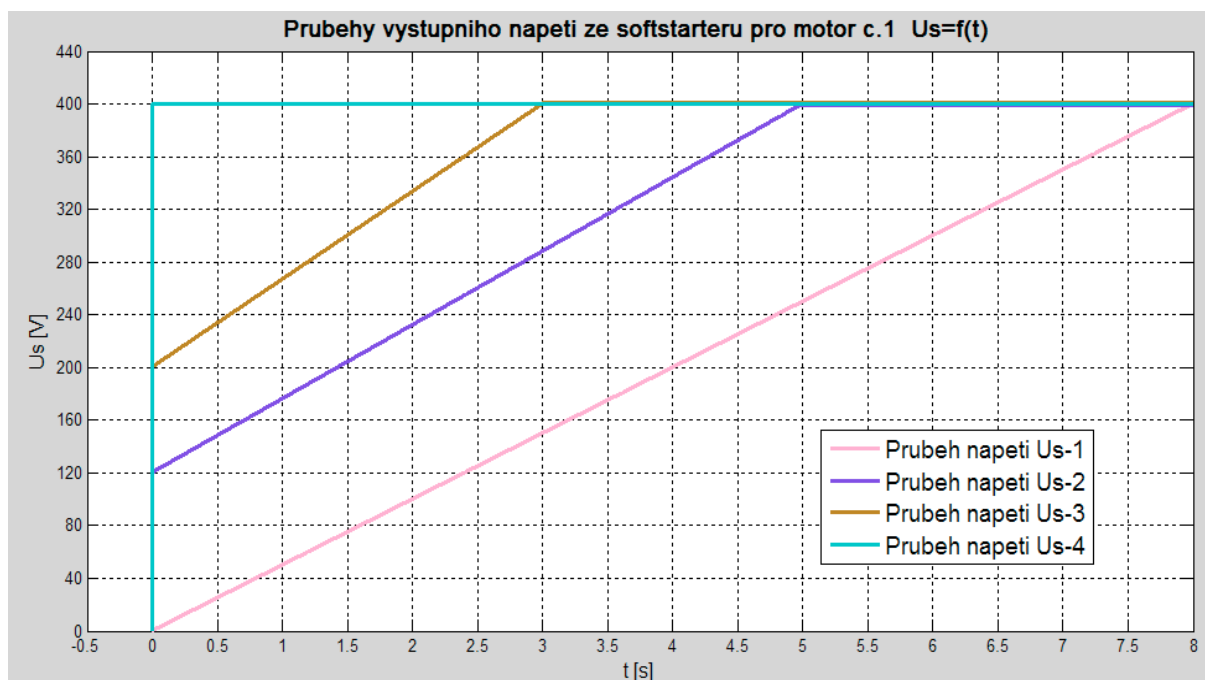
Proud motoru pro výstupní napětí 300 V ze softstartéru ($U_0 = 30 \%$ napájecího napětí)

$$I_{zab} = I_{1sPCH} \cdot k_u = 1225 \cdot 0,3 = \underline{\underline{367,5 \text{ A}}} \quad (52)$$

3 Simulační ověření vlastností asynchronního motoru napájeného ze softstartéru [11]

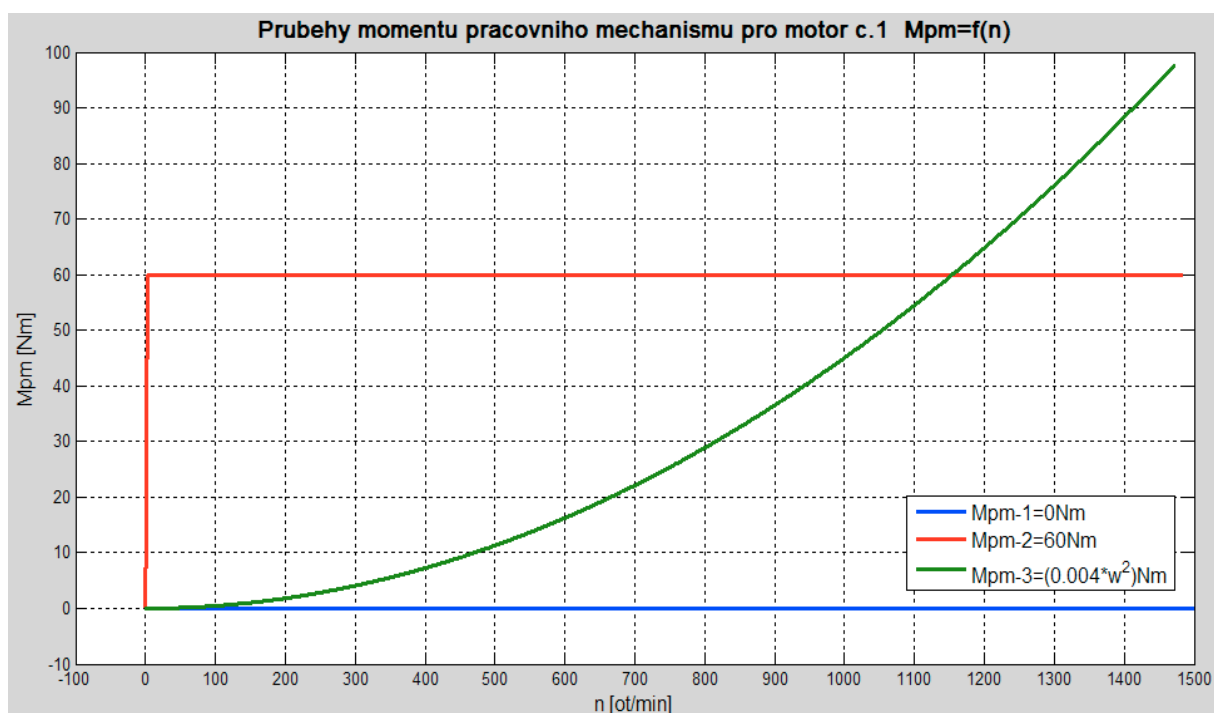
3.1 Simulační ověření asynchronního motoru č. 1, u kterého je od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky

3.1.1 Průběhy variant výstupního napětí ze softstartéru (vstupního napětí pro motor č. 1)



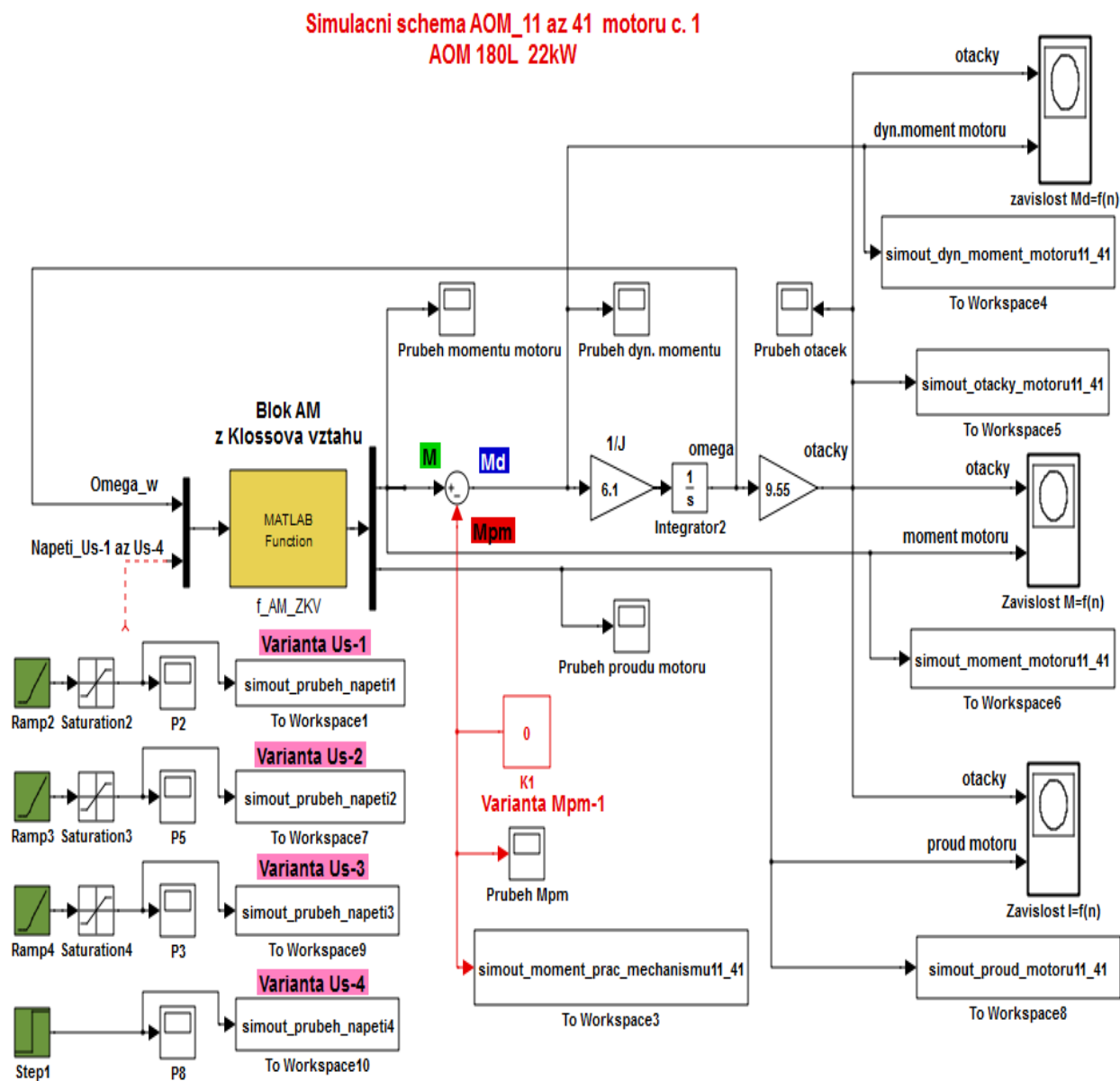
Obr. 16 - Průběhy čtyř variant výstupního napětí ze softstartéru (U_{s-1} až U_{s-4}) pro motor č. 1

3.1.2 Průběhy variant momentu pracovního mechanismu pro motor č. 1

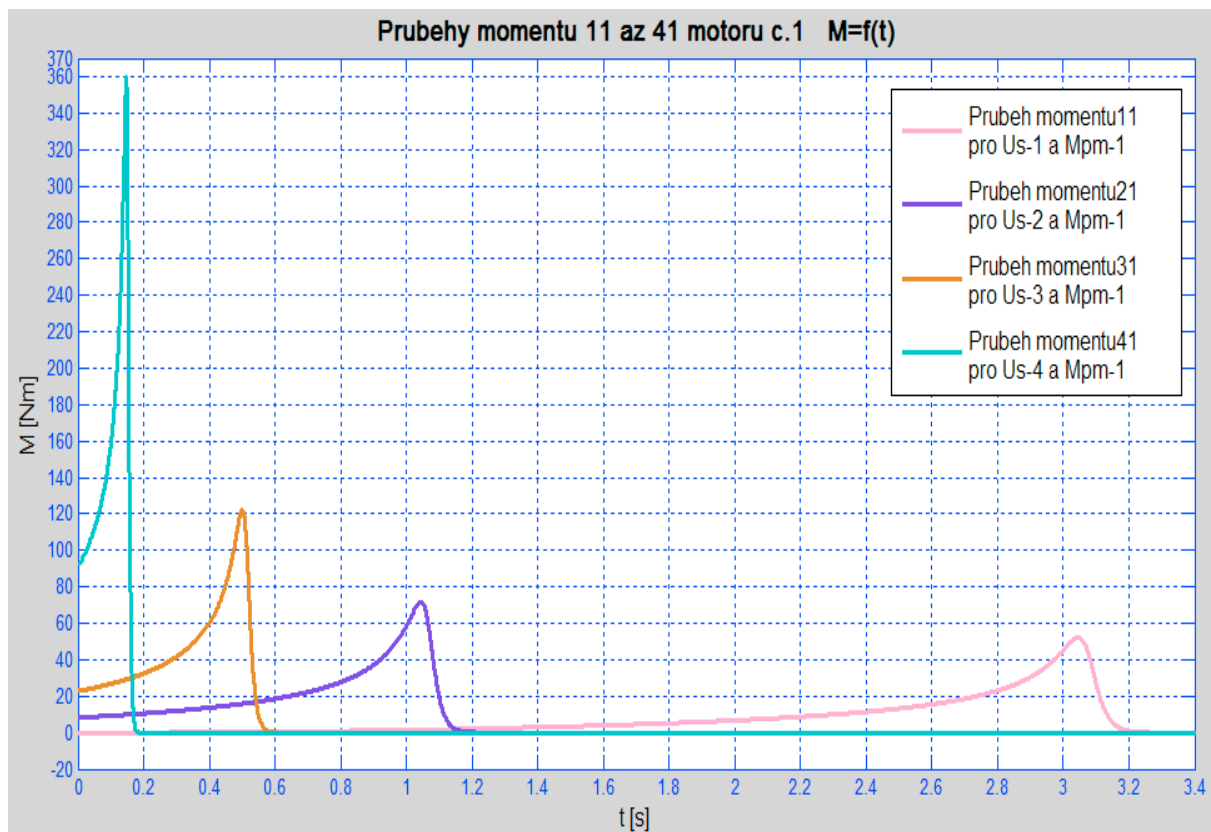


Obr. 17 - Průběhy tří variant momentů pracovního mechanismu (M_{pm-1} až M_{pm-3}) pro motor č. 1

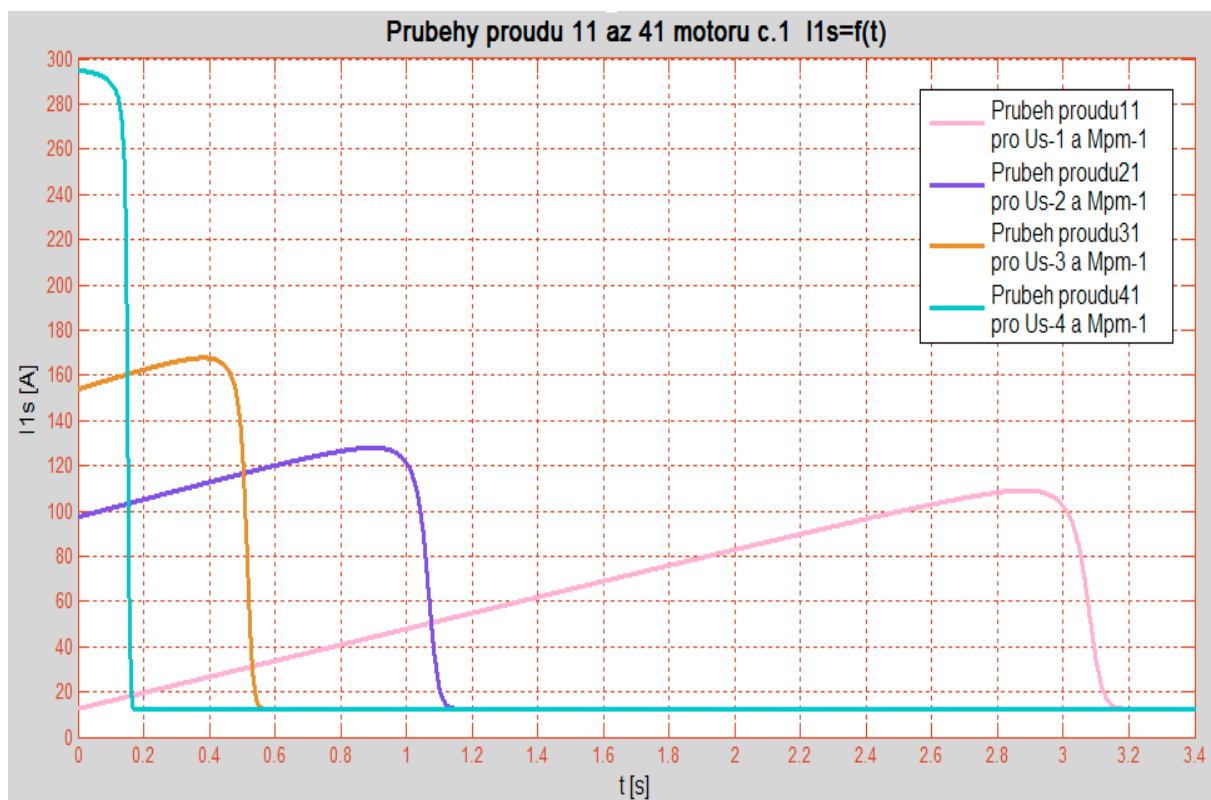
3.1.3 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-1}



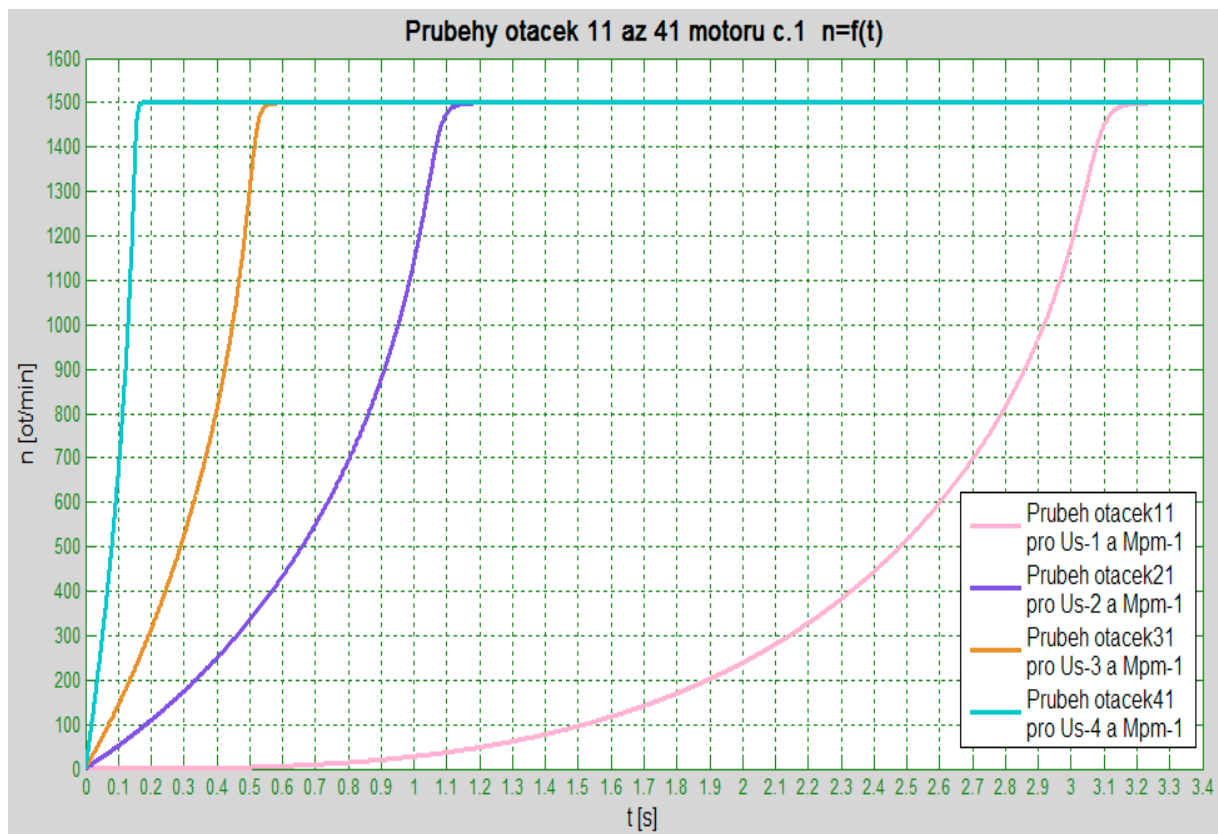
Obr. 18 - Celkové simulační schéma pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-1} = 0 \text{ Nm}$



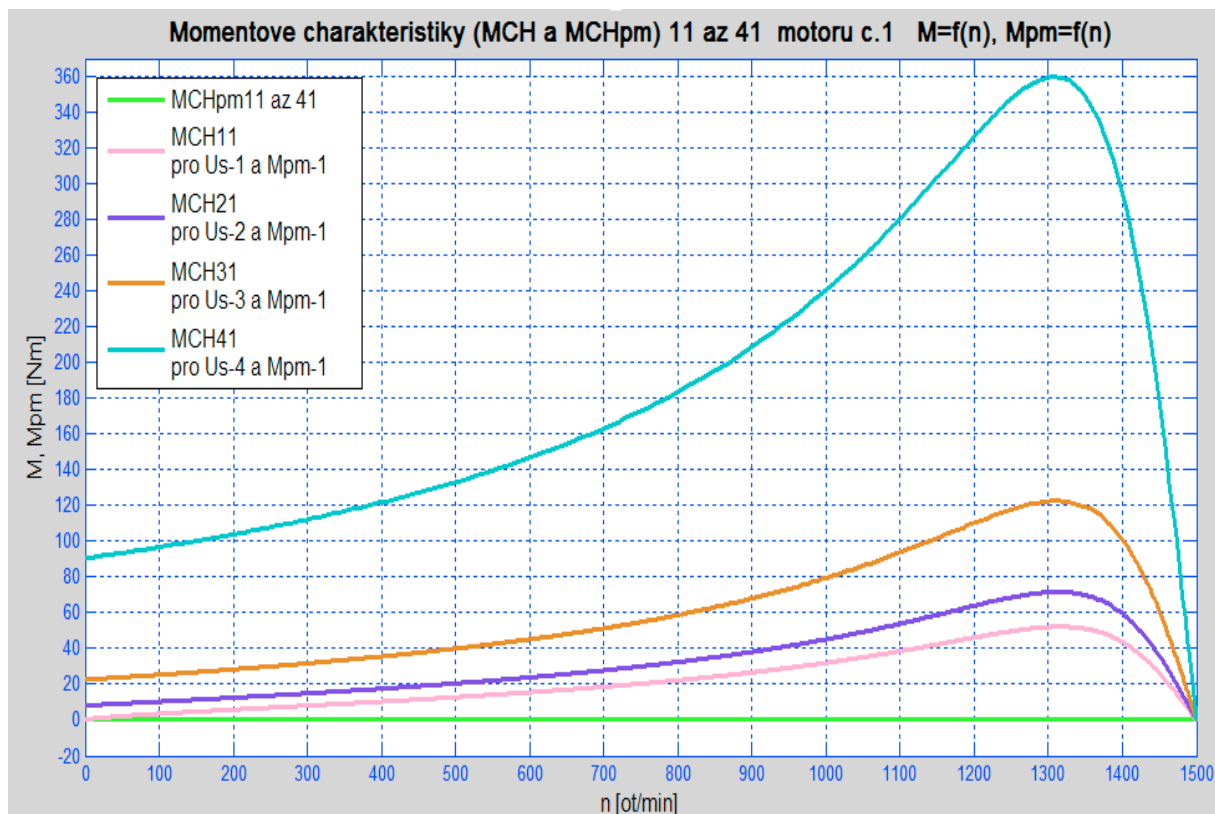
Obr. 19 - Průběhy momentů motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0$ Nm



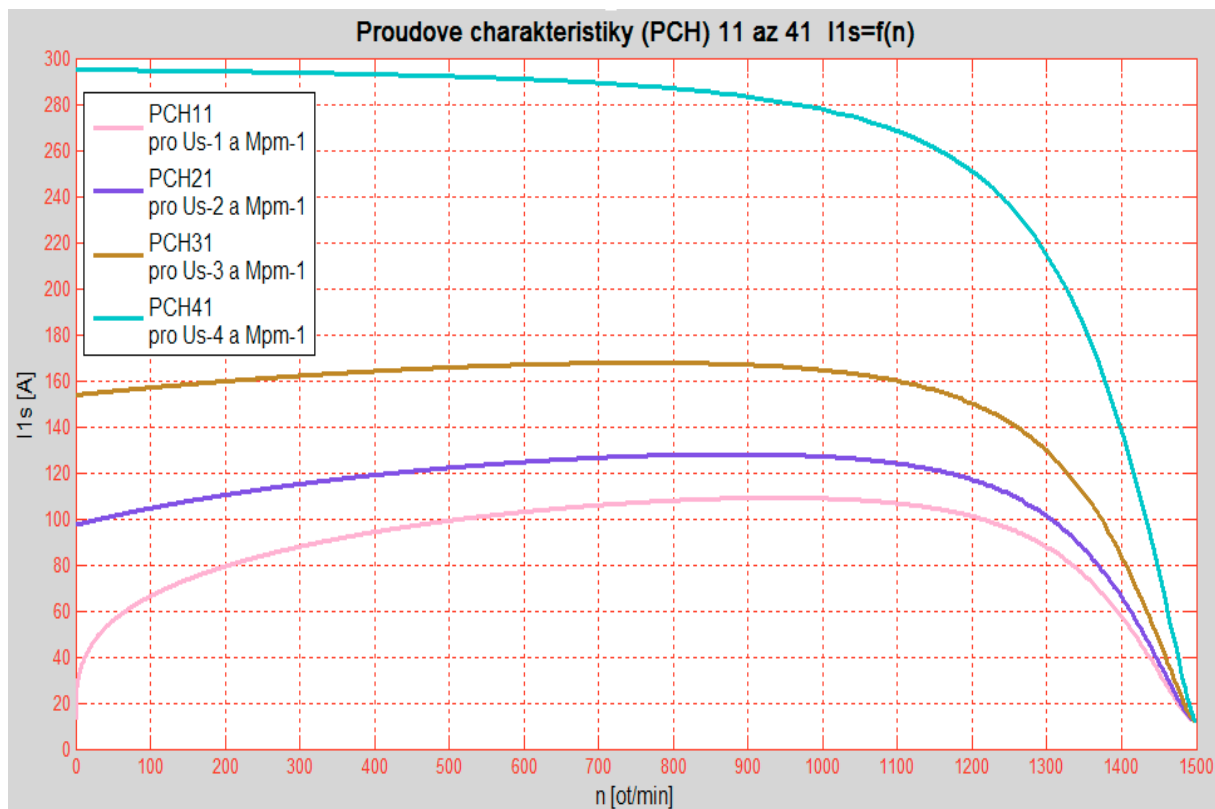
Obr. 20 - Průběhy proudů motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0$ Nm



Obr. 21 - Průběhy otáček motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0 \text{ Nm}$

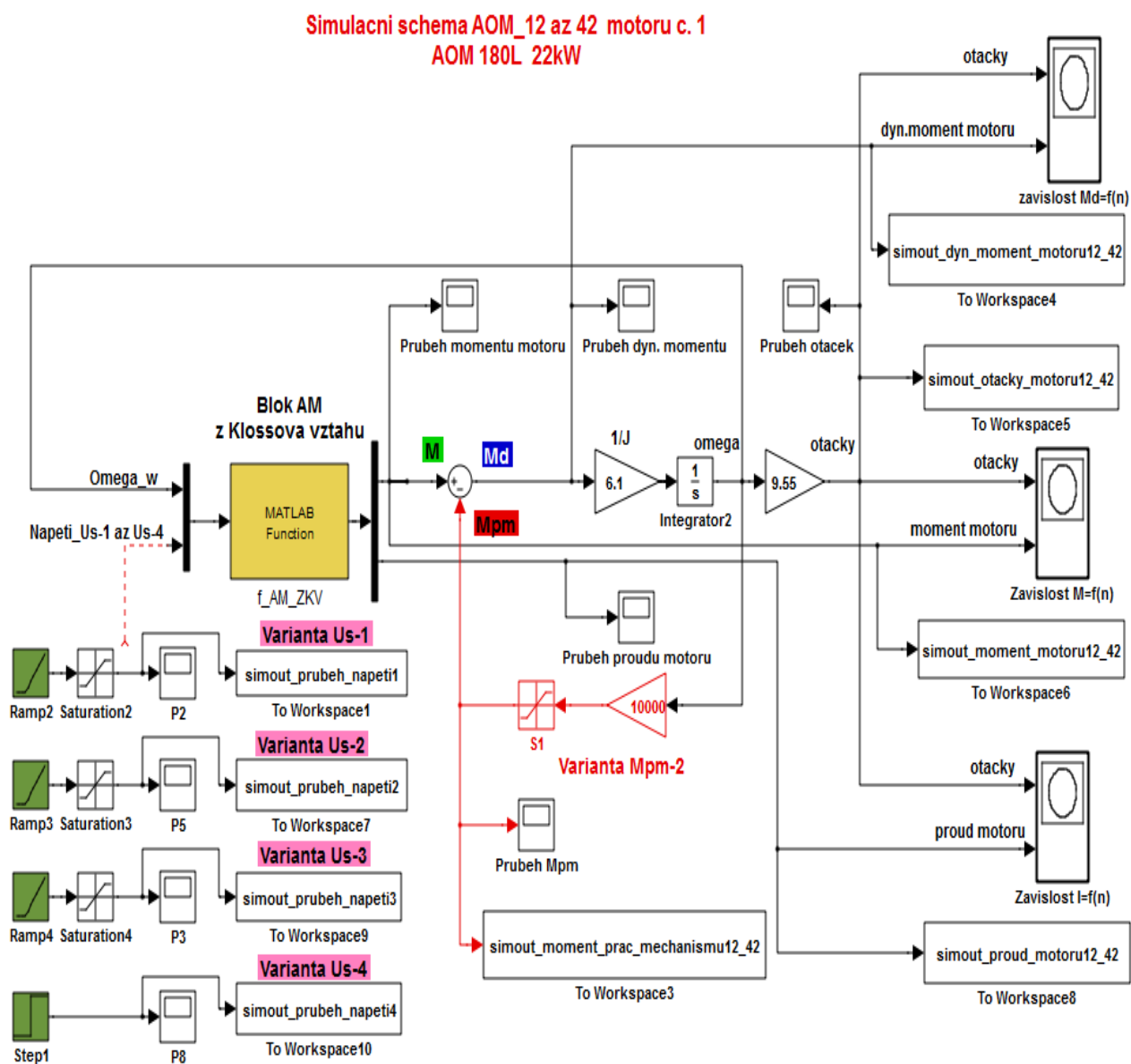


Obr. 22 - Momentové charakteristiky včetně charakteristiky M_{pm-1} motoru č. 1 (pro Us-1 až Us-4)

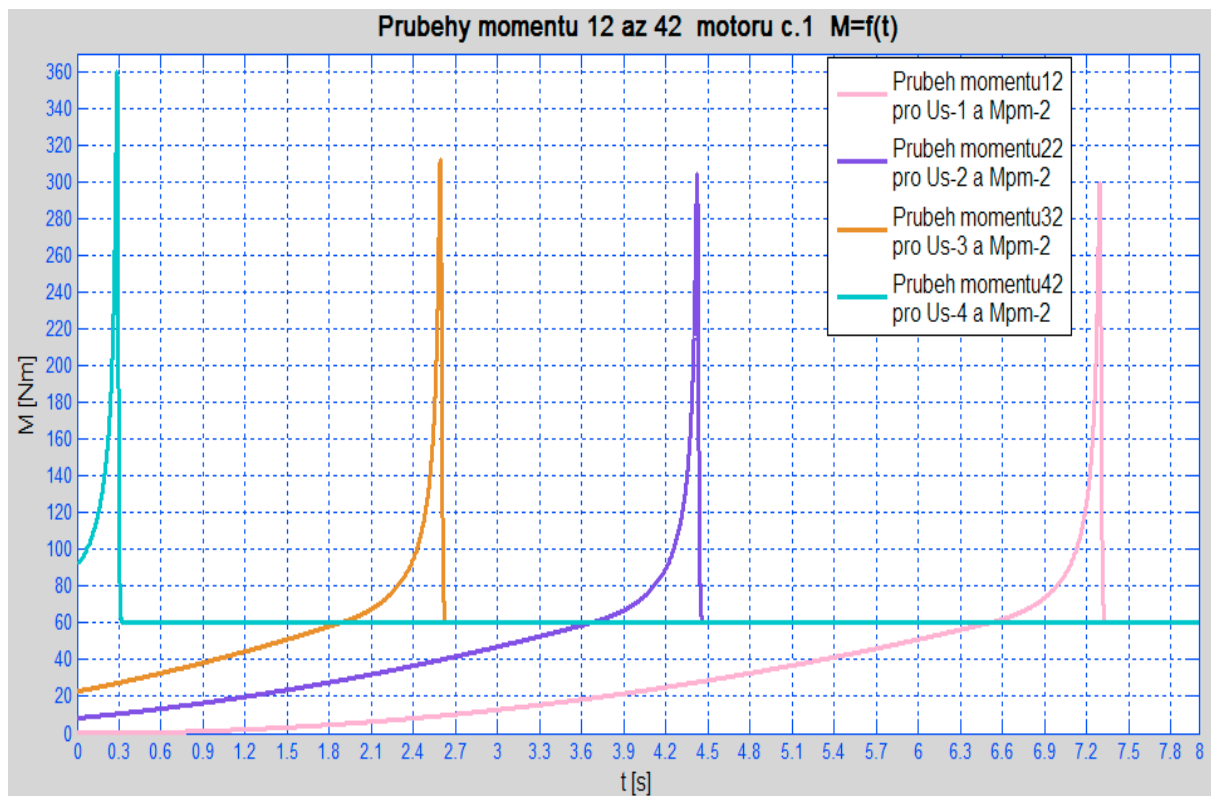


Obr. 23 - Proudové charakteristiky motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0 Nm$

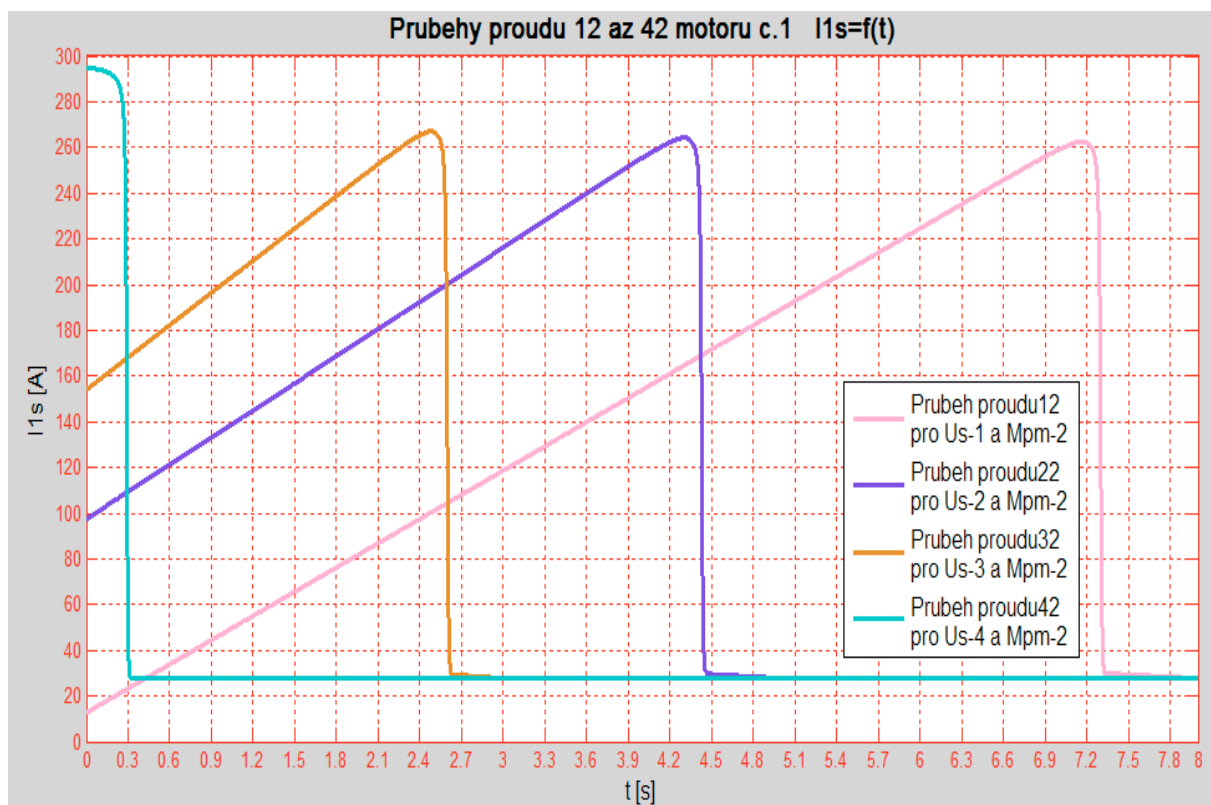
3.1.4 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-2}



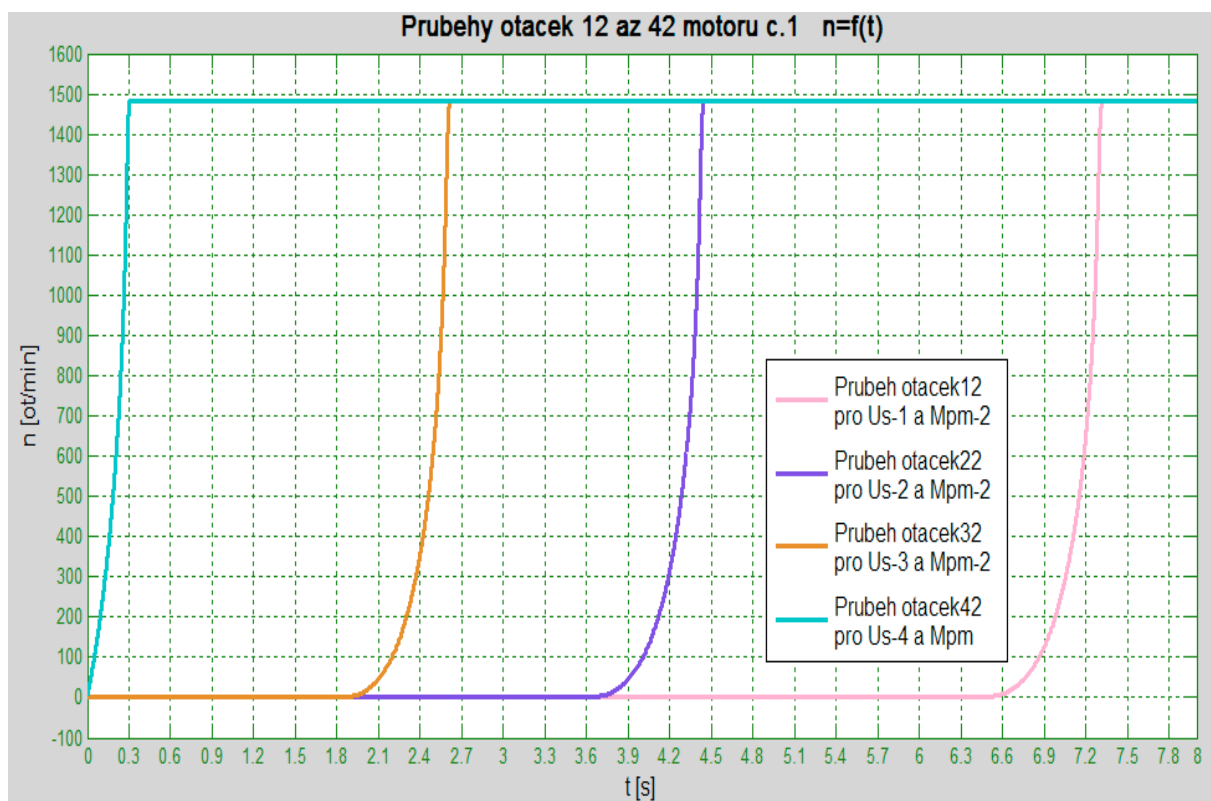
Obr. 24 - Celkové simulační schéma pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-2} = 60 \text{ Nm}$



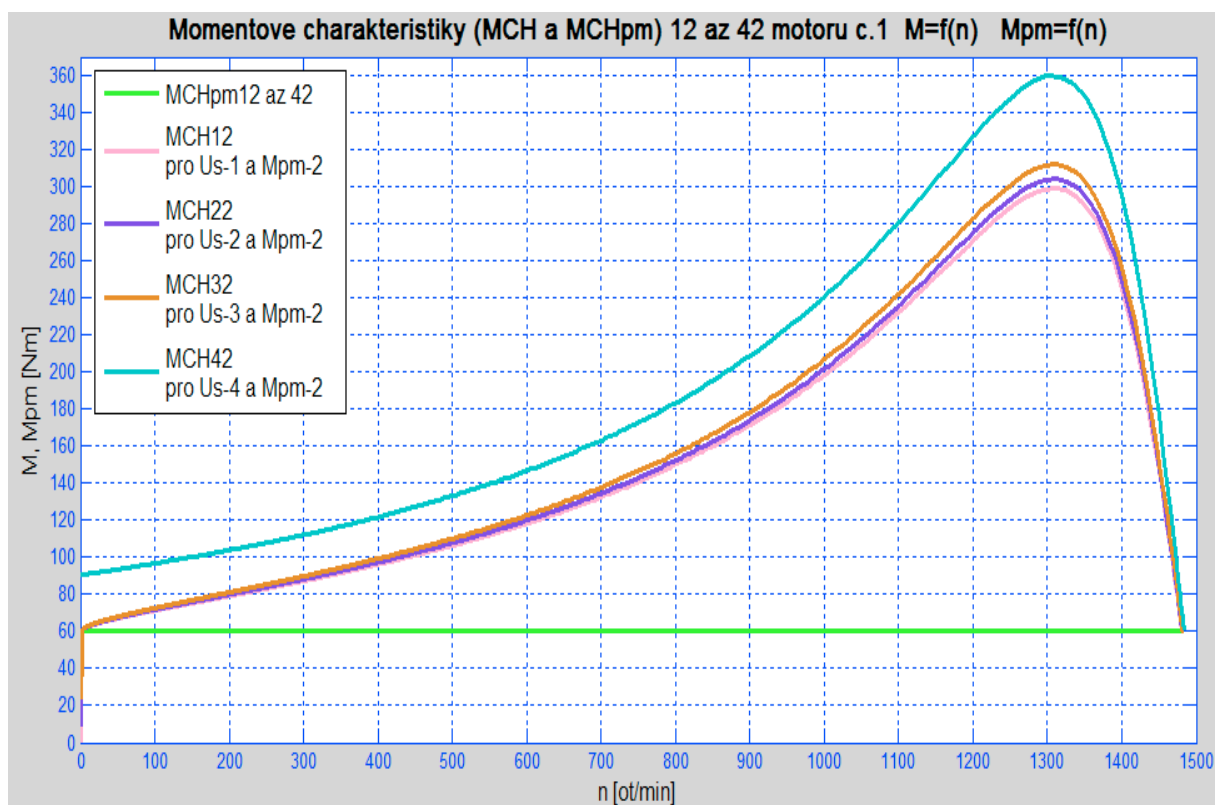
Obr. 25 - Průběhy momentů motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-2} = 60$ Nm



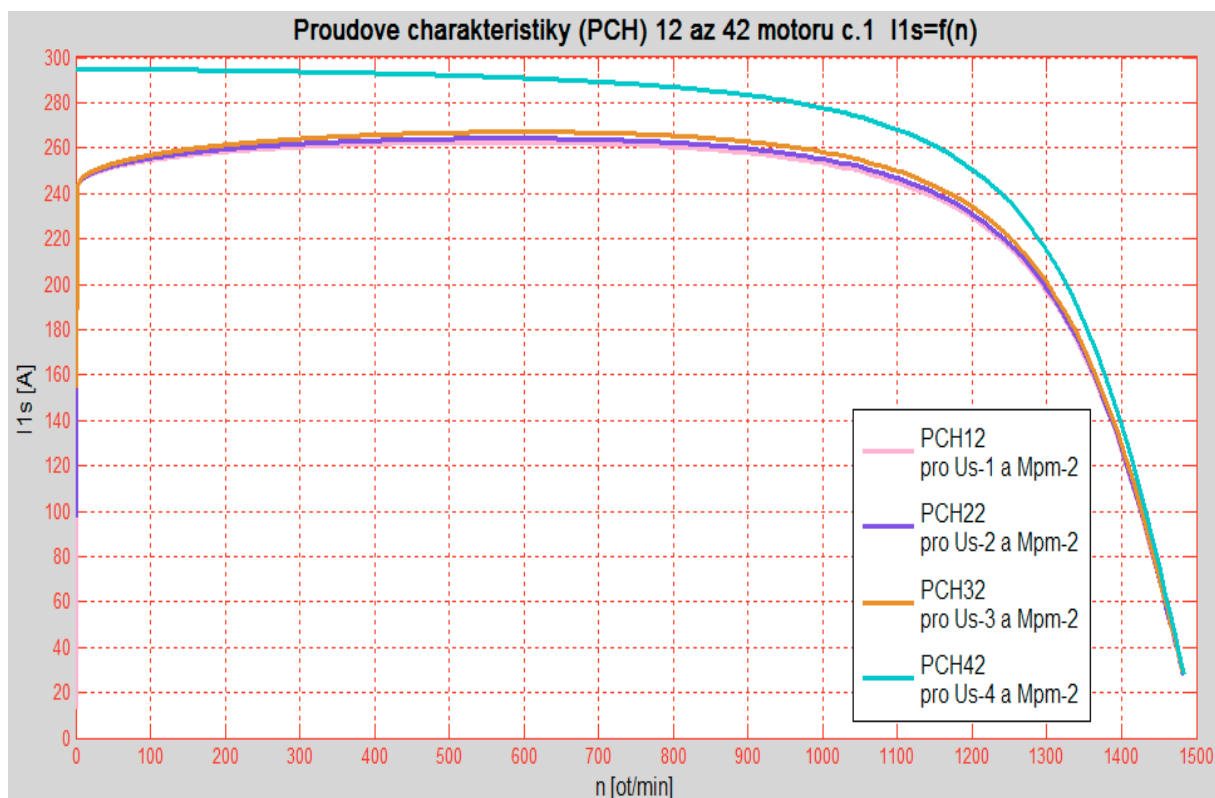
Obr. 26 - Průběhy proudů motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-2} = 60$ Nm



Obr. 27 - Průběhy otáček motoru č. 1 pro U_s-1 až U_s-4 , $M_{pm-2} = 60$ Nm

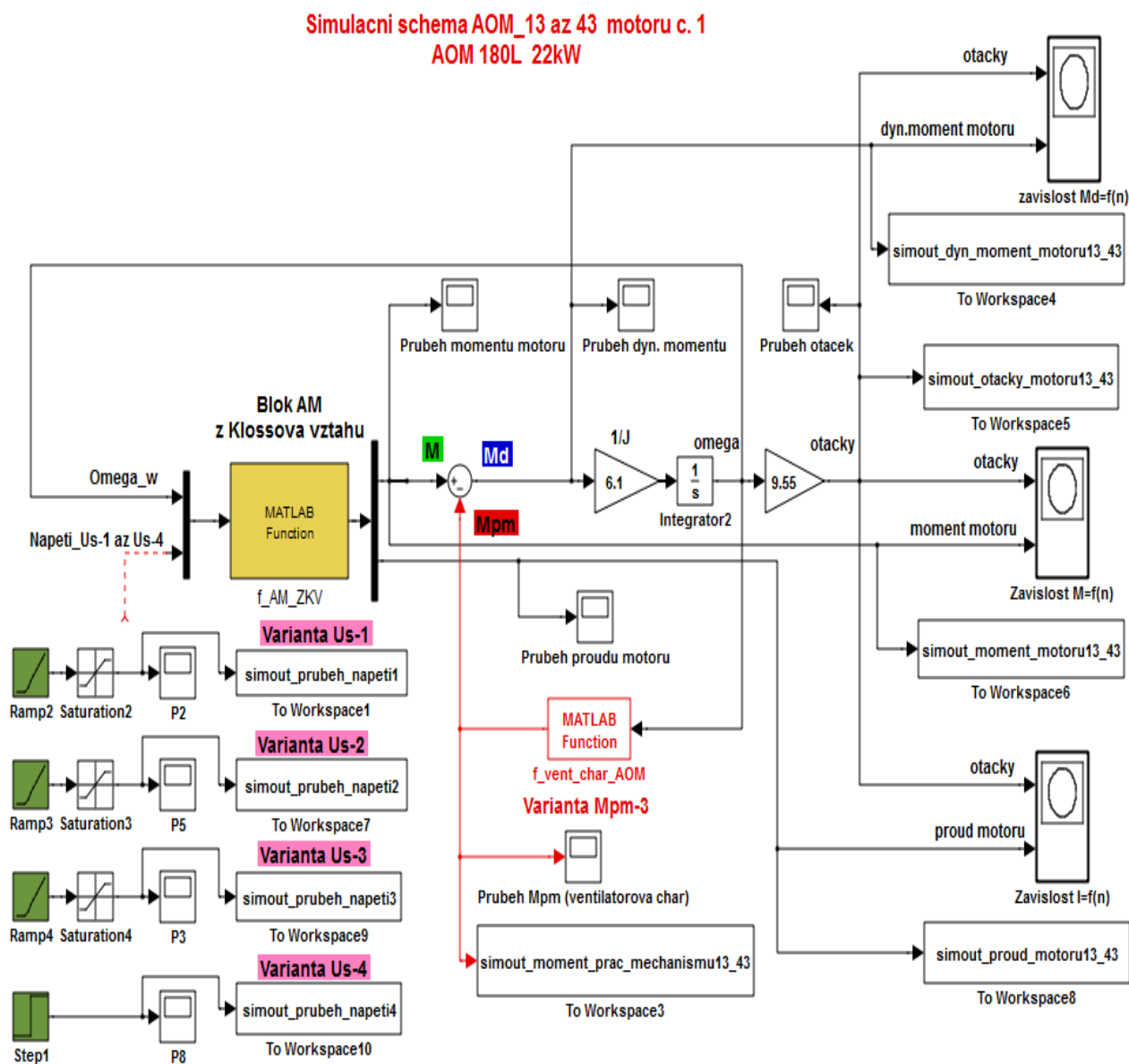


Obr. 28 - Momentové charakteristiky včetně charakteristiky M_{pm} -2 motoru č. 1 (pro Us-1 až Us-4)

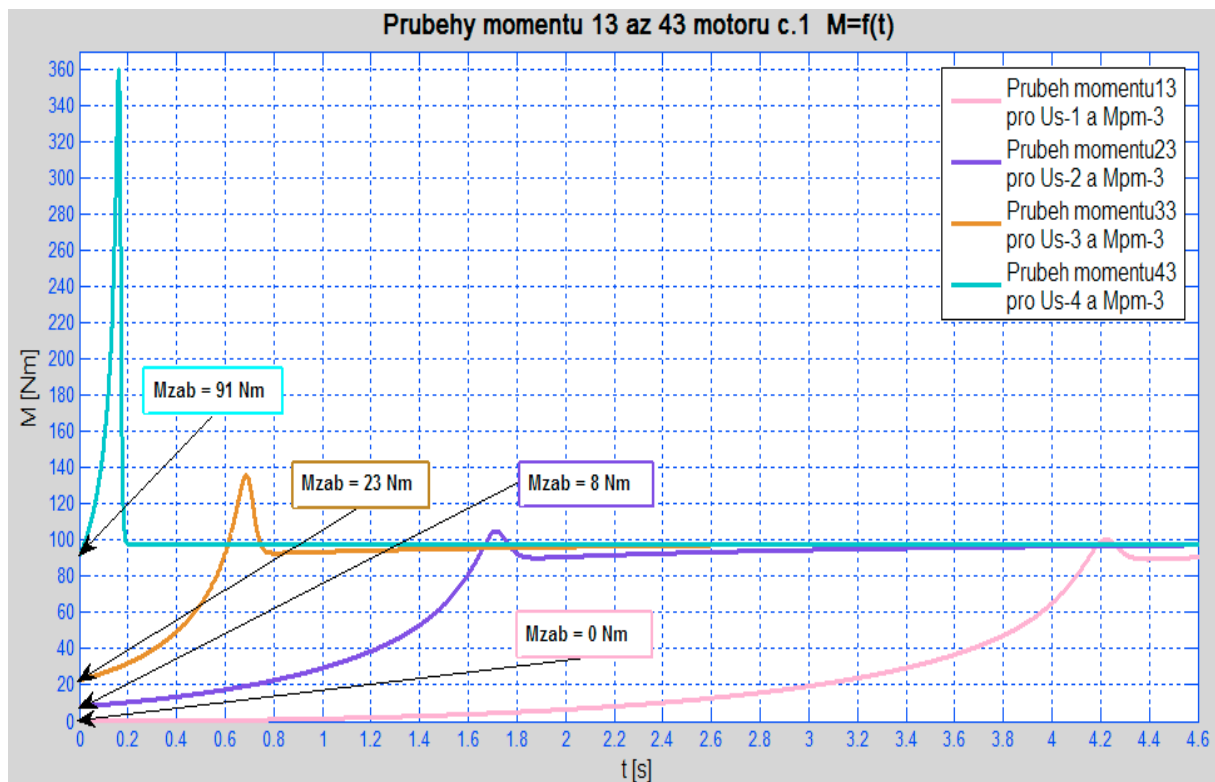


Obr. 29 - Proudové charakteristiky motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm}-2 = 60 Nm$

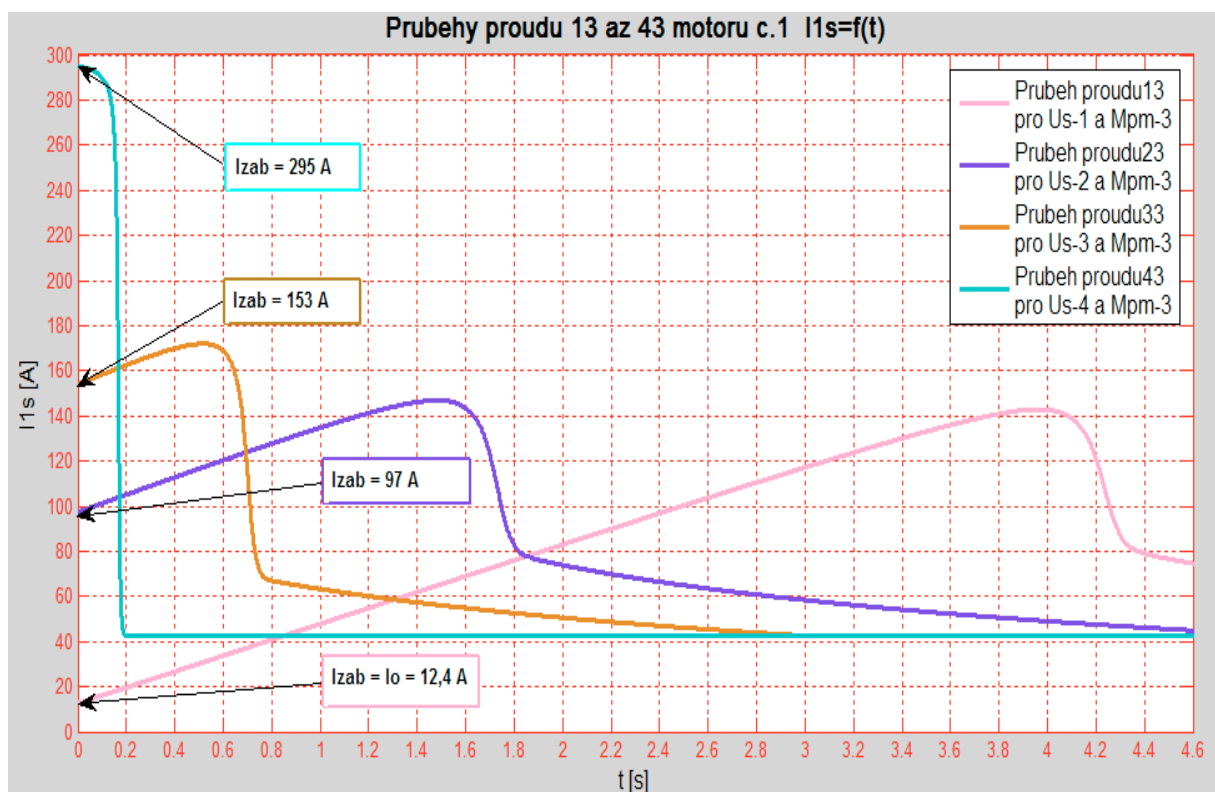
3.1.5 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-3}



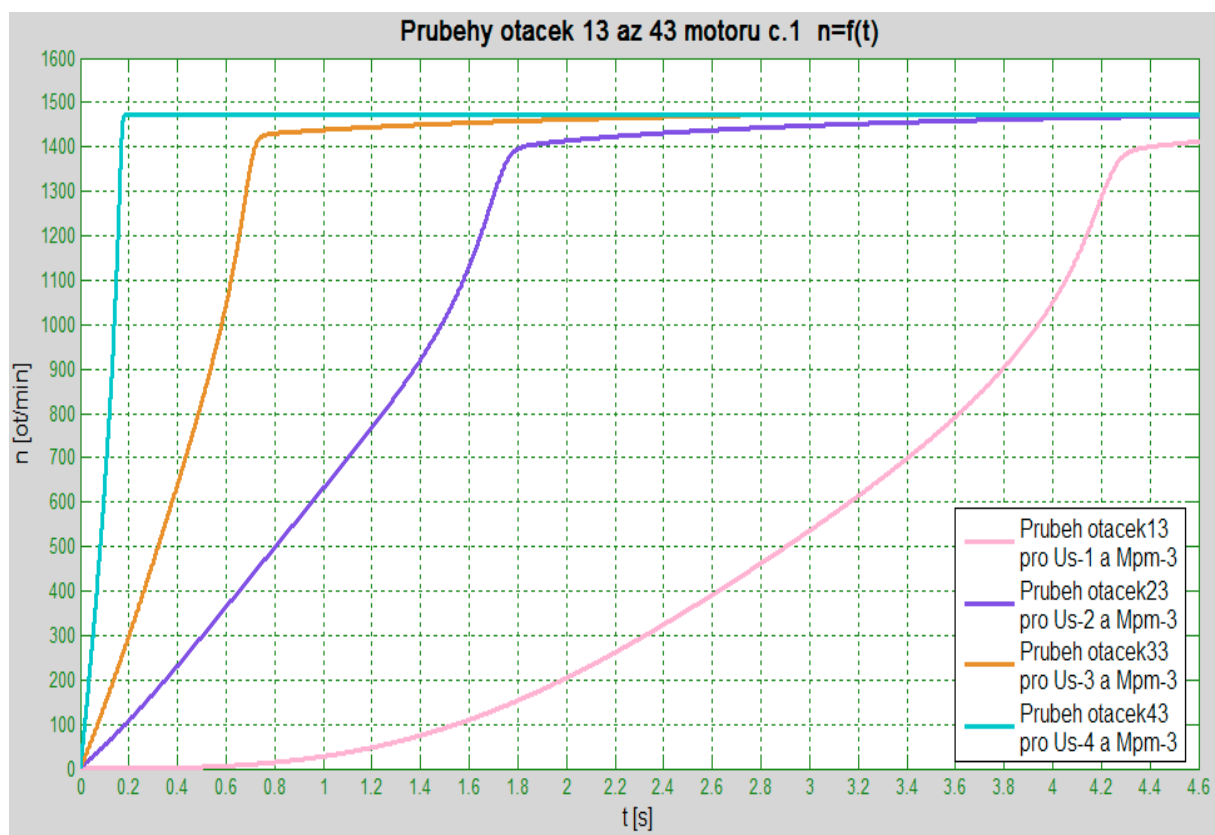
Obr. 30 - Celkové simulační schéma pro motor č. 1 s U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-3} = (0,004 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$



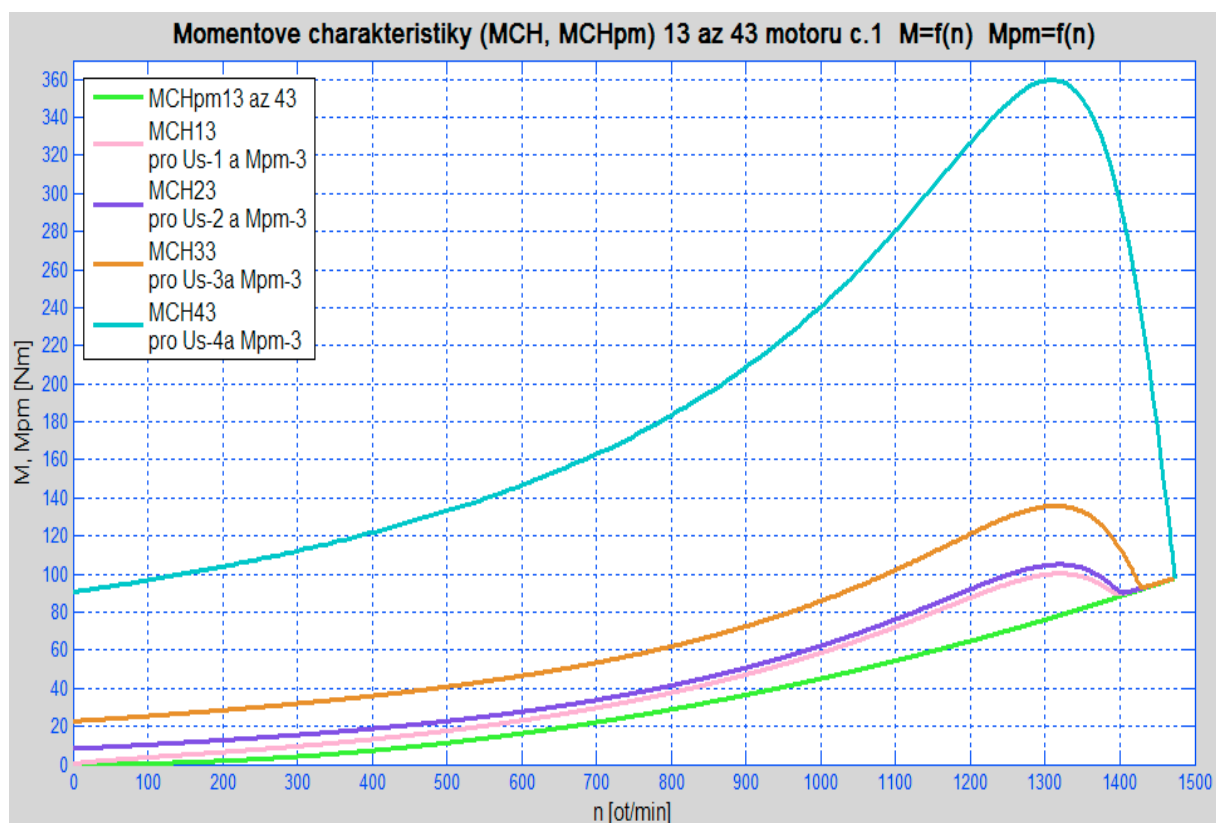
Obr. 31 - Průběhy momentů motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4 s hodnotami záběrných momentů pro $M_{pm-3} = (0,004 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$



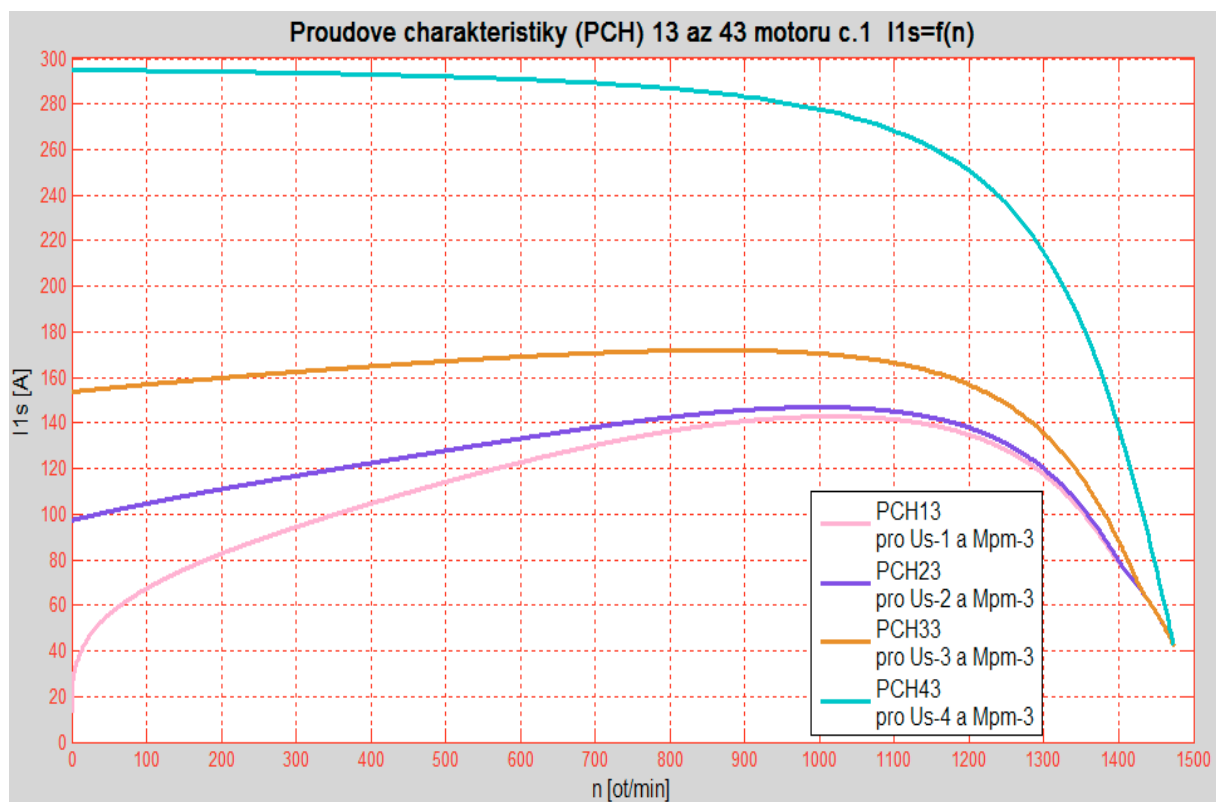
Obr. 32 - Průběhy proudů motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4 s hodnotami záběrných proudů pro $M_{pm-3} = (0,004 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$



Obr. 33 - Průběhy otáček motoru č. 1 pro $Us-1$ až $Us-4$, $M_{pm-3} = (0,004 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$

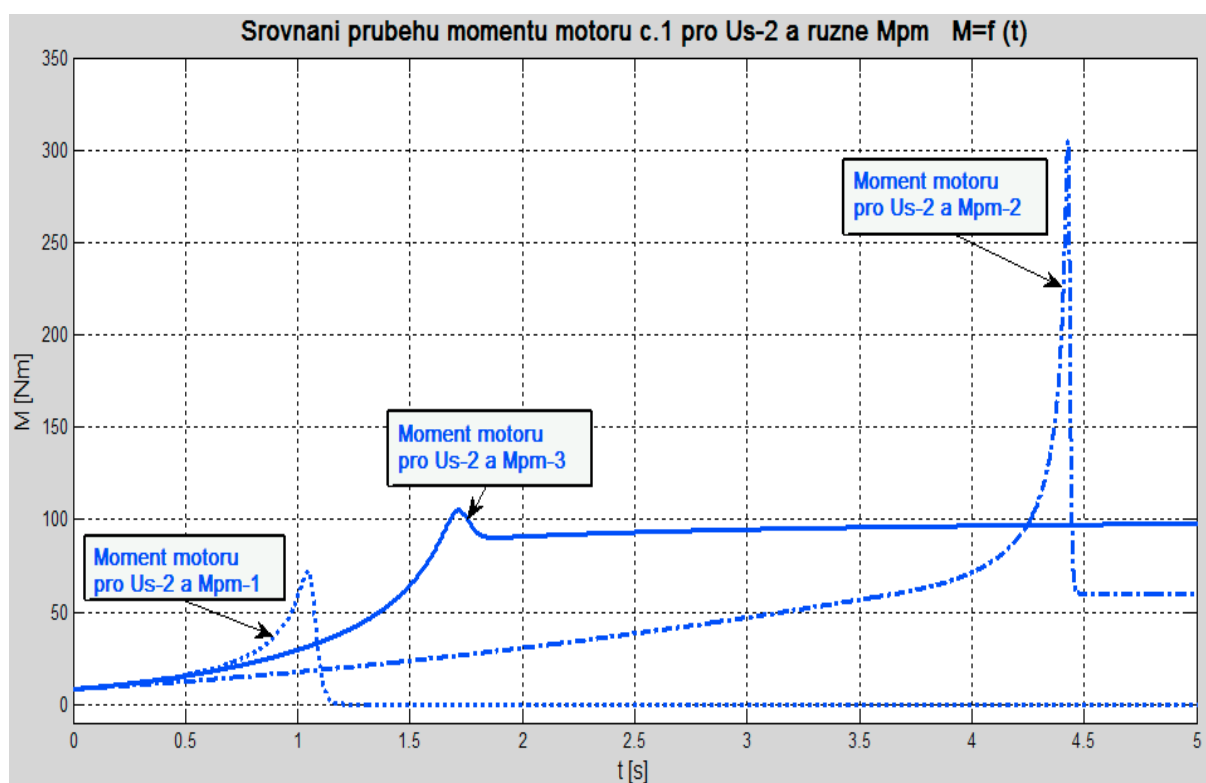


Obr. 34 - Momentové charakteristiky včetně charakteristiky Mpm-3 motoru č. 1 (pro Us-1 až Us-4)

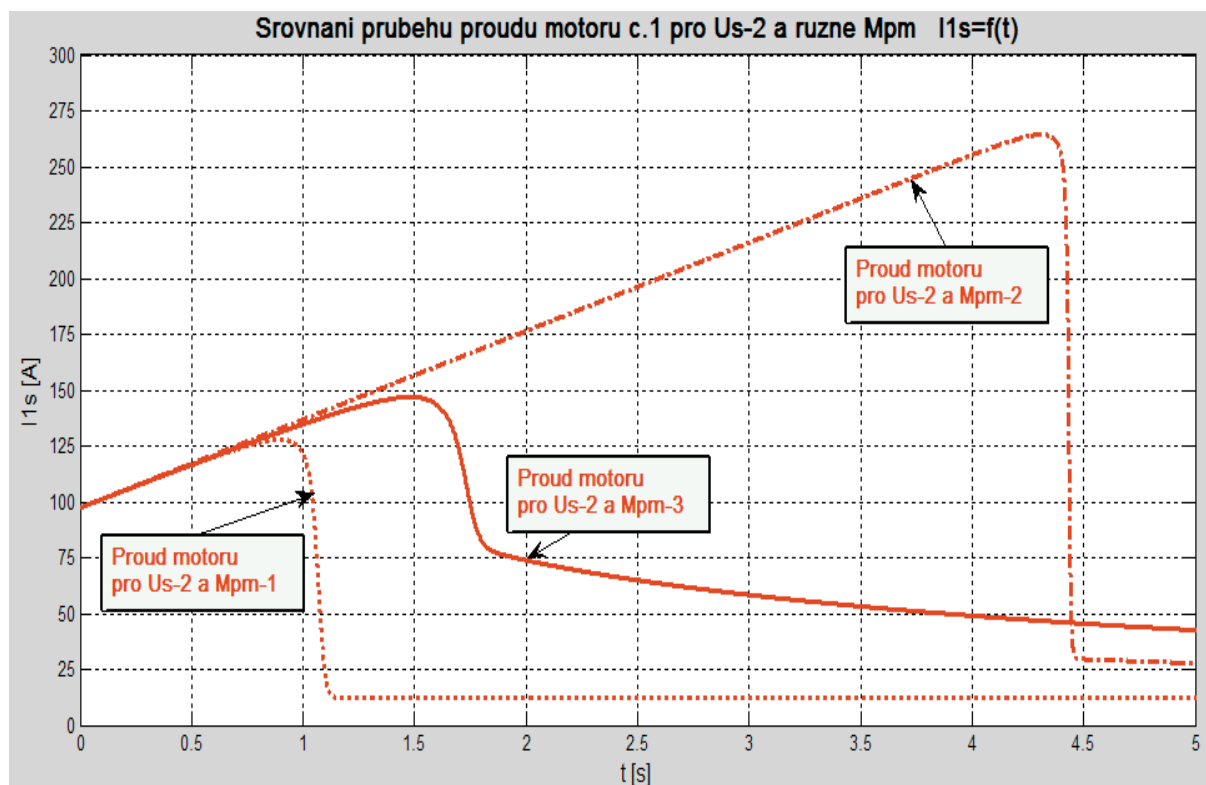


Obr. 35 - Proudové charakteristiky motoru č. 1 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-3} = (0,004 \cdot \omega^2) Nm$

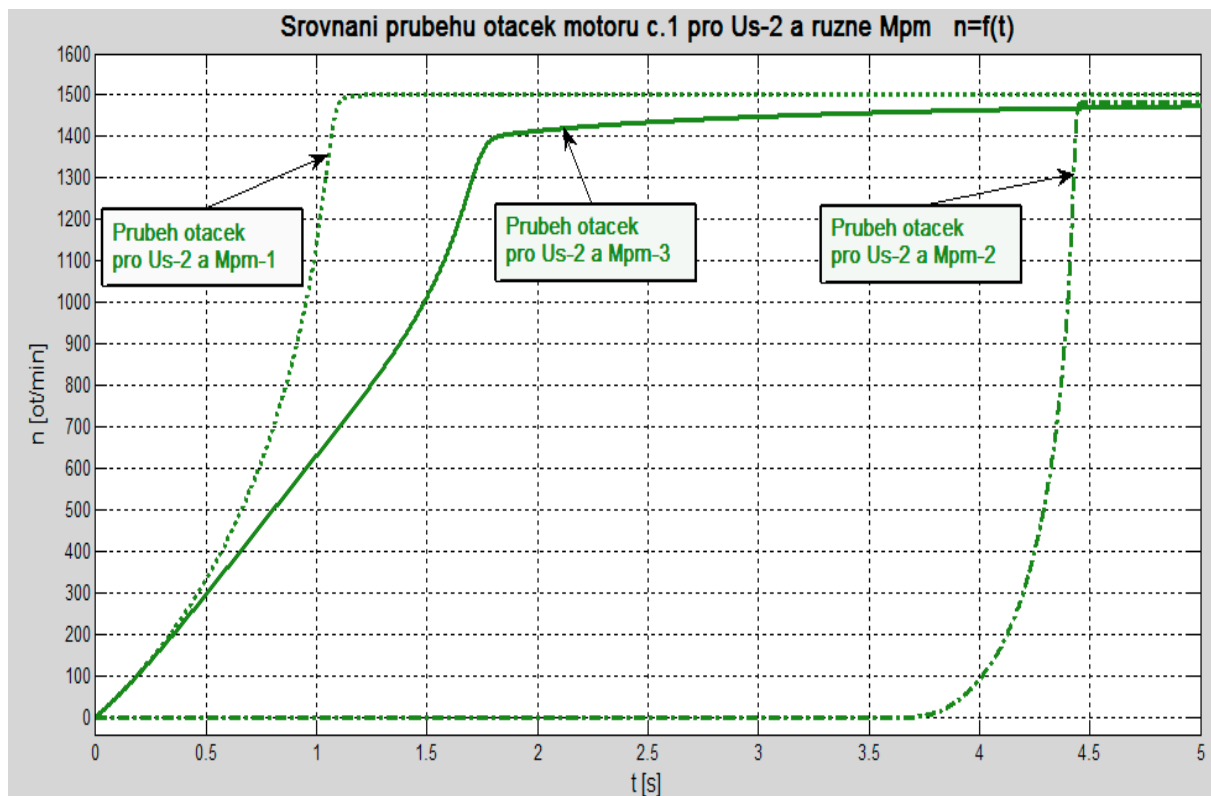
3.1.6 Srovnání jednotlivých průběhů motoru č. 1 pro vybrané napětí U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}



Obr. 36 - Srovnání průběhů momentů motoru č. 1 pro U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}



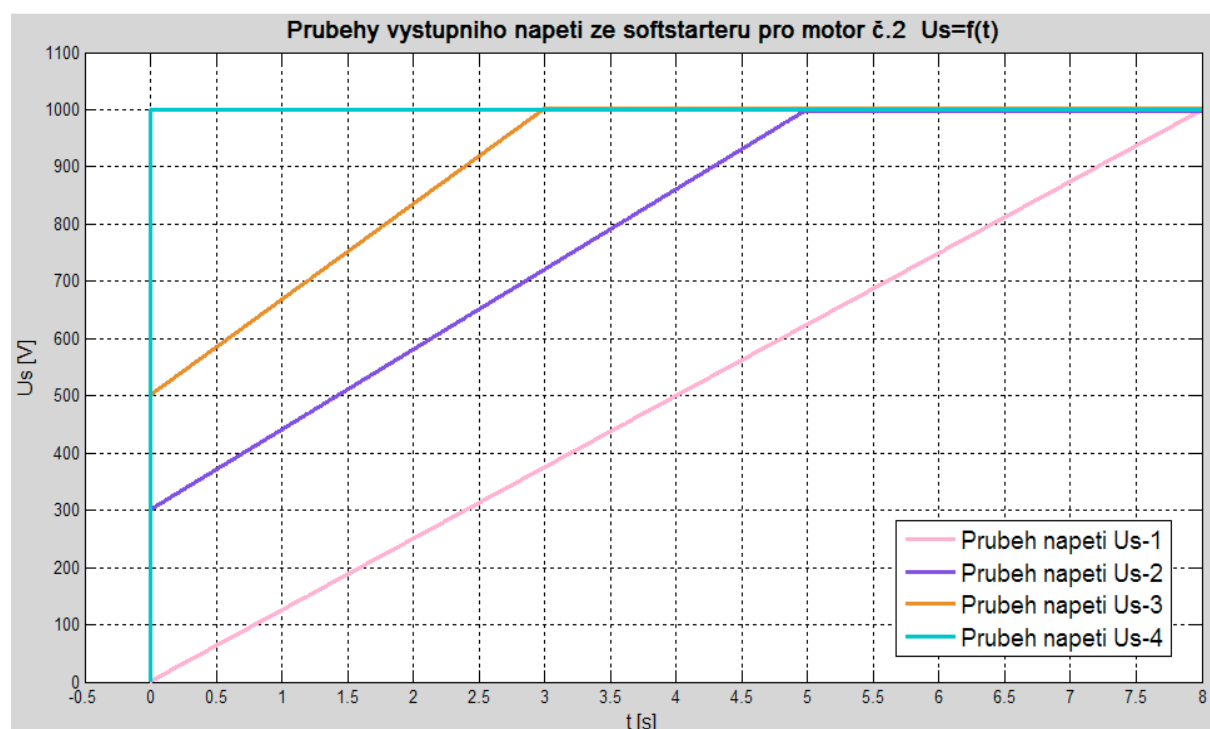
Obr. 37 - Srovnání průběhů proudů motoru č. 1 pro U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}



Obr. 38 - Srovnání průběhů otáček motoru č. 1 pro Us-2 a Mpm-1 až Mpm-3

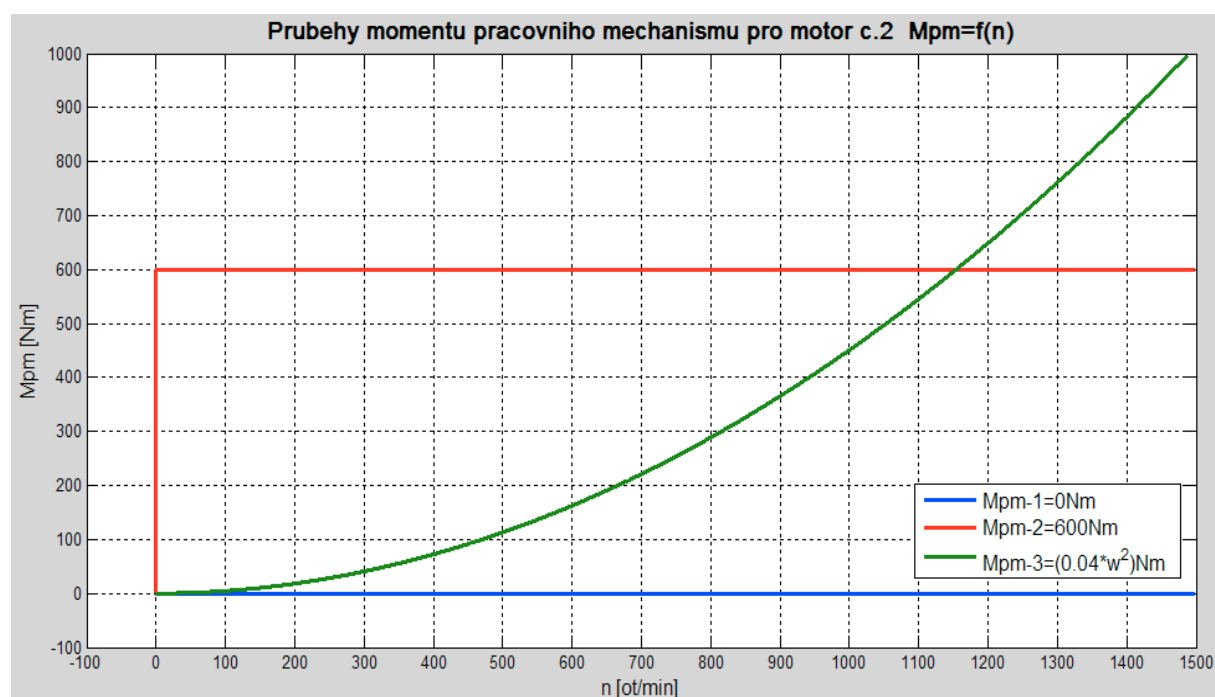
3.2 Simulační ověření asynchronního motoru č. 2, u kterého není od výrobce k dispozici změřený zadaný průběh momentové a proudové charakteristiky

3.2.1 Průběhy variant výstupního napětí ze softstartéru (vstupního napětí pro motor č. 2)



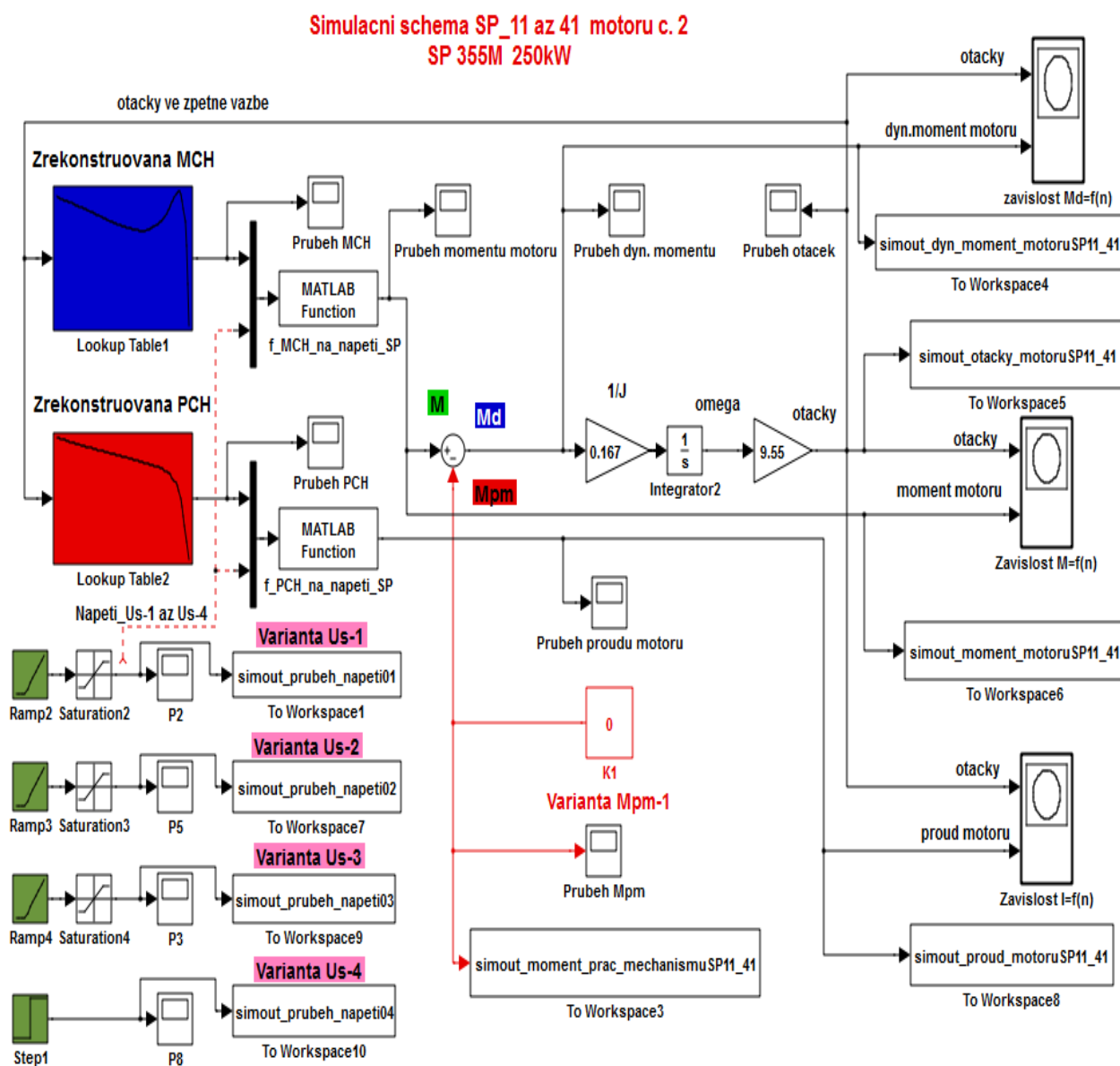
Obr. 39 - Průběhy čtyř variant výstupního napětí ze softstartéru (U_{s-1} až U_{s-4}) pro motor č. 2

3.2.2 Průběhy variant momentu pracovního mechanismu pro motor č. 2

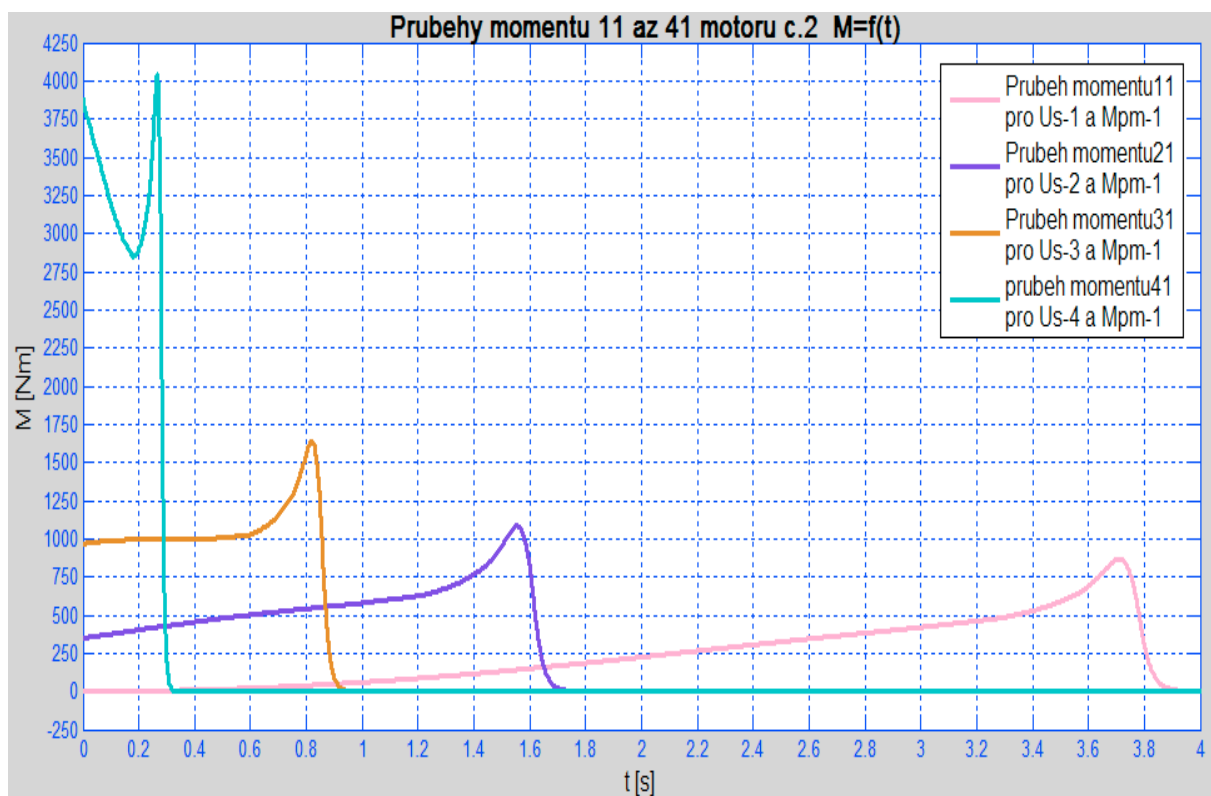


Obr. 40 - Průběhy tří variant momentu pracovního mechanismu (M_{pm-1} až M_{pm-3}) pro motor č. 2

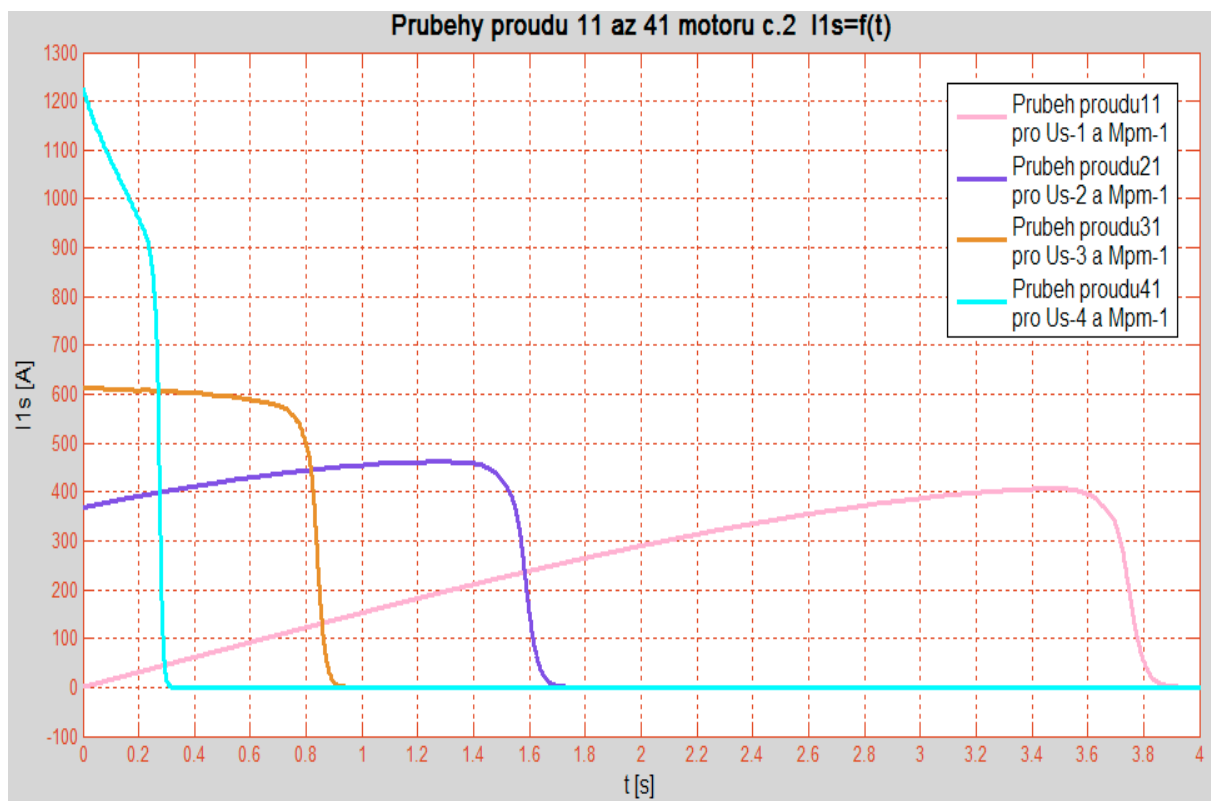
3.2.3 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-1}



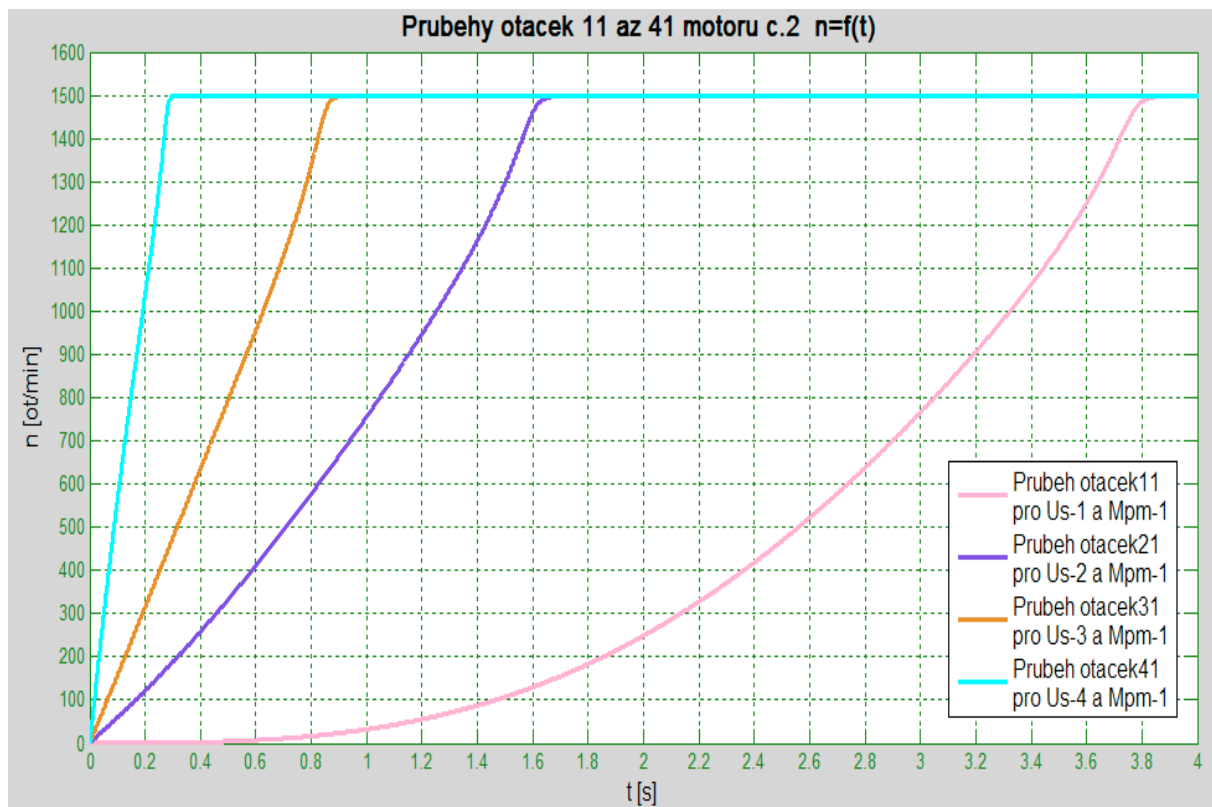
Obr. 41 - Celkové simulační schéma pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-1} = 0$ Nm



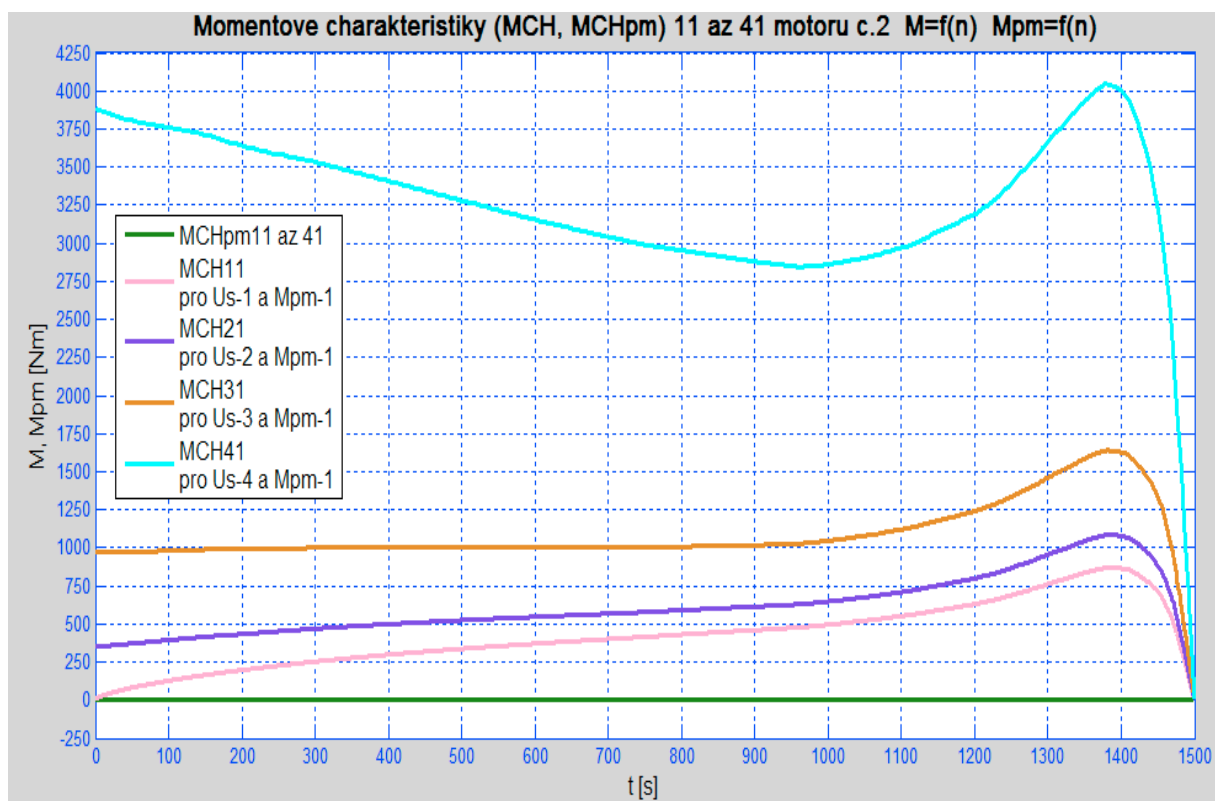
Obr. 42 - Průběhy momentů motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0 \text{ Nm}$



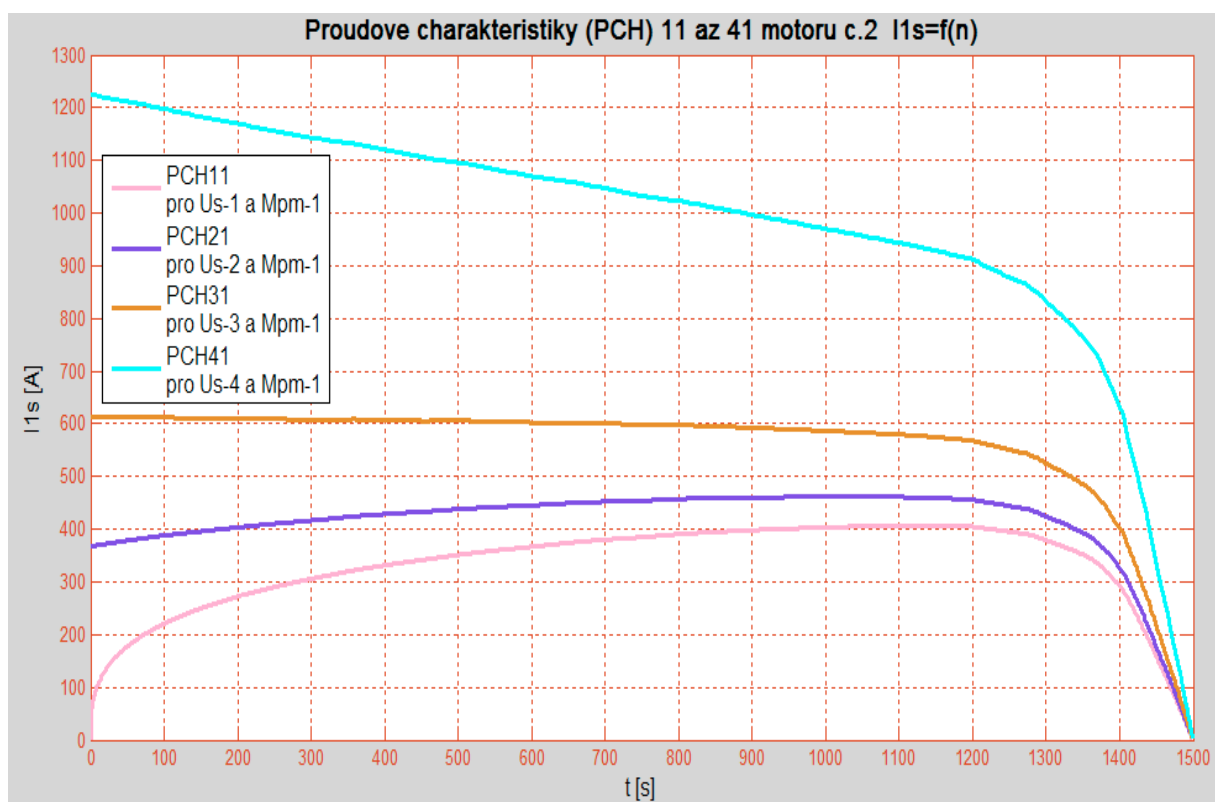
Obr. 43 - Průběhy proudů motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0 \text{ Nm}$



Obr. 44 - Průběhy otáček motoru č. 2 pro U_s-1 až U_s-4 , $M_{pm-1} = 0$ Nm

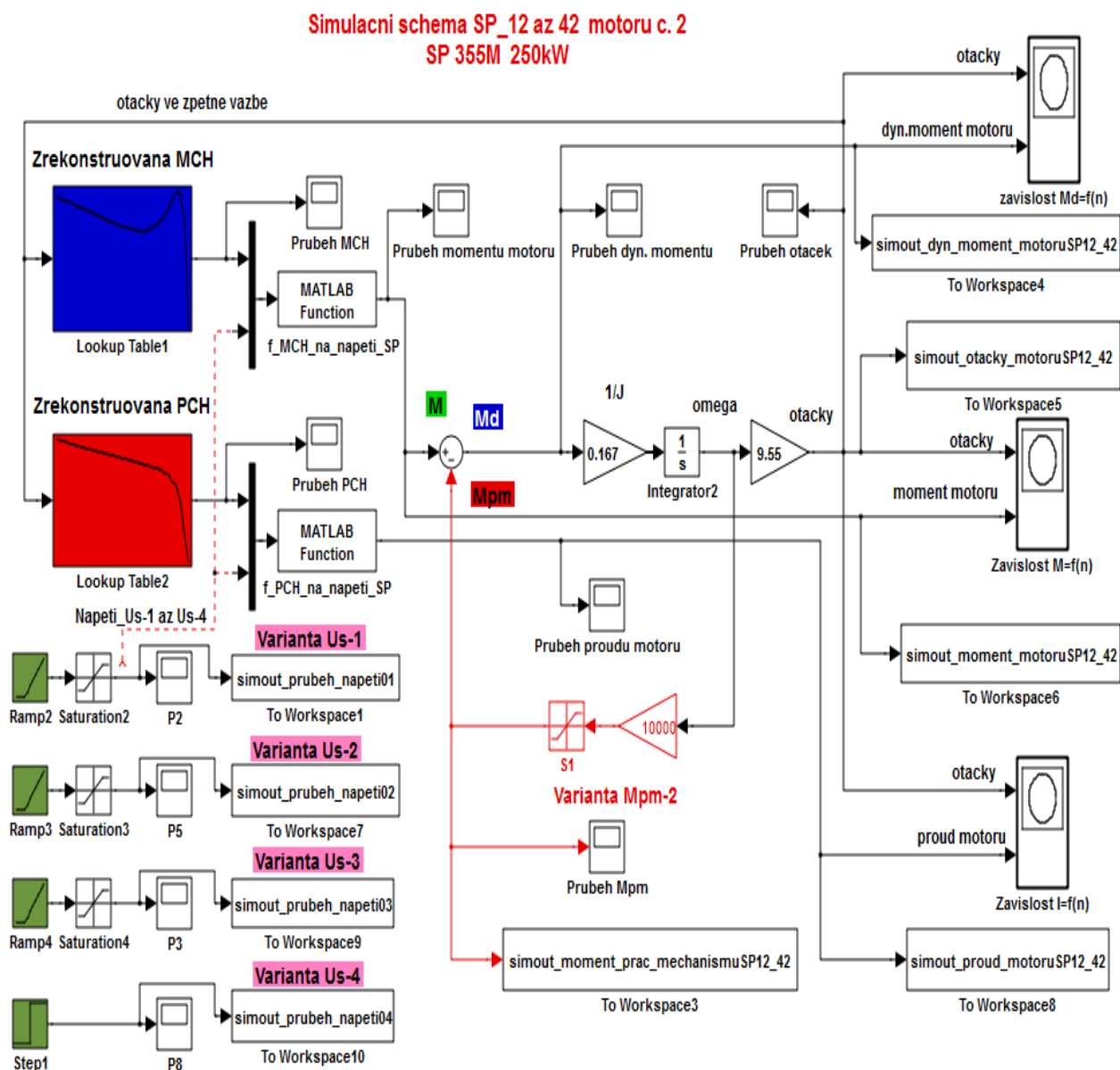


Obr. 45 - Momentové charakteristiky včetně charakteristiky M_{pm-1} motoru č. 2 (pro Us-1 až Us-4)

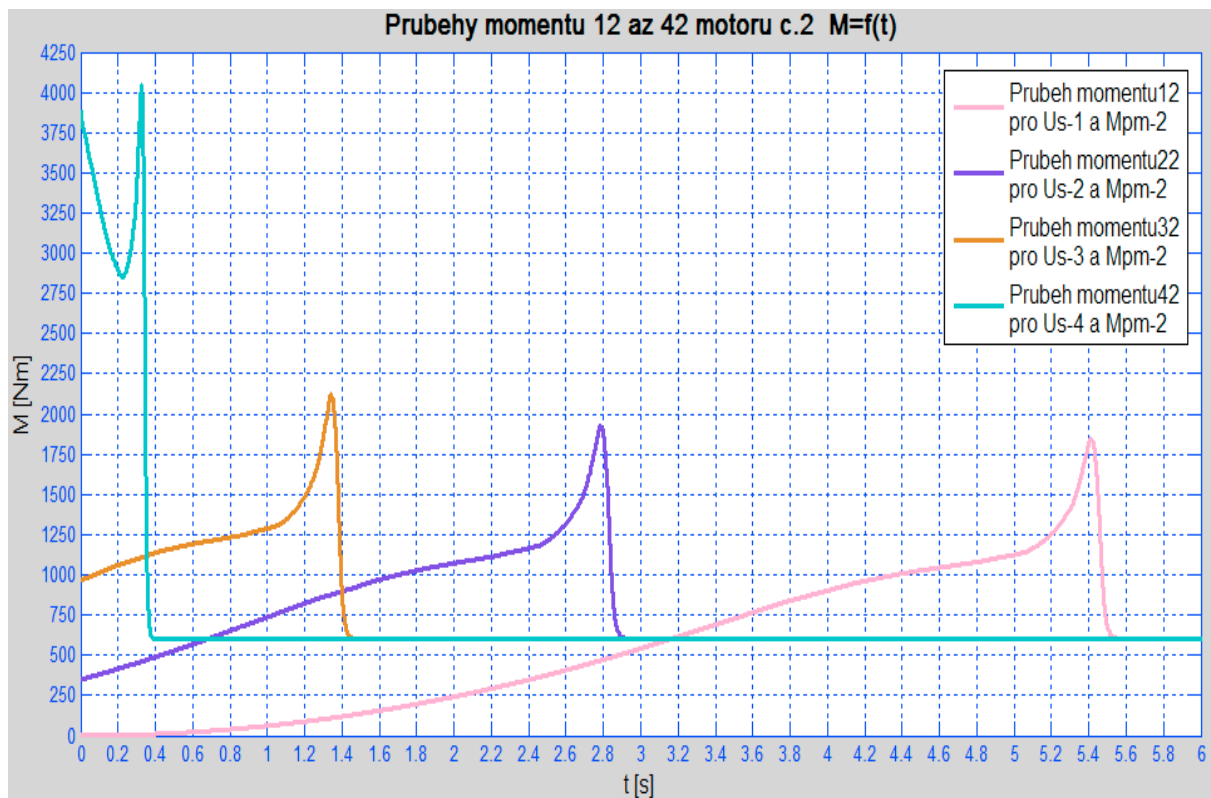


Obr. 46 - Proudové charakteristiky motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-1} = 0 \text{ Nm}$

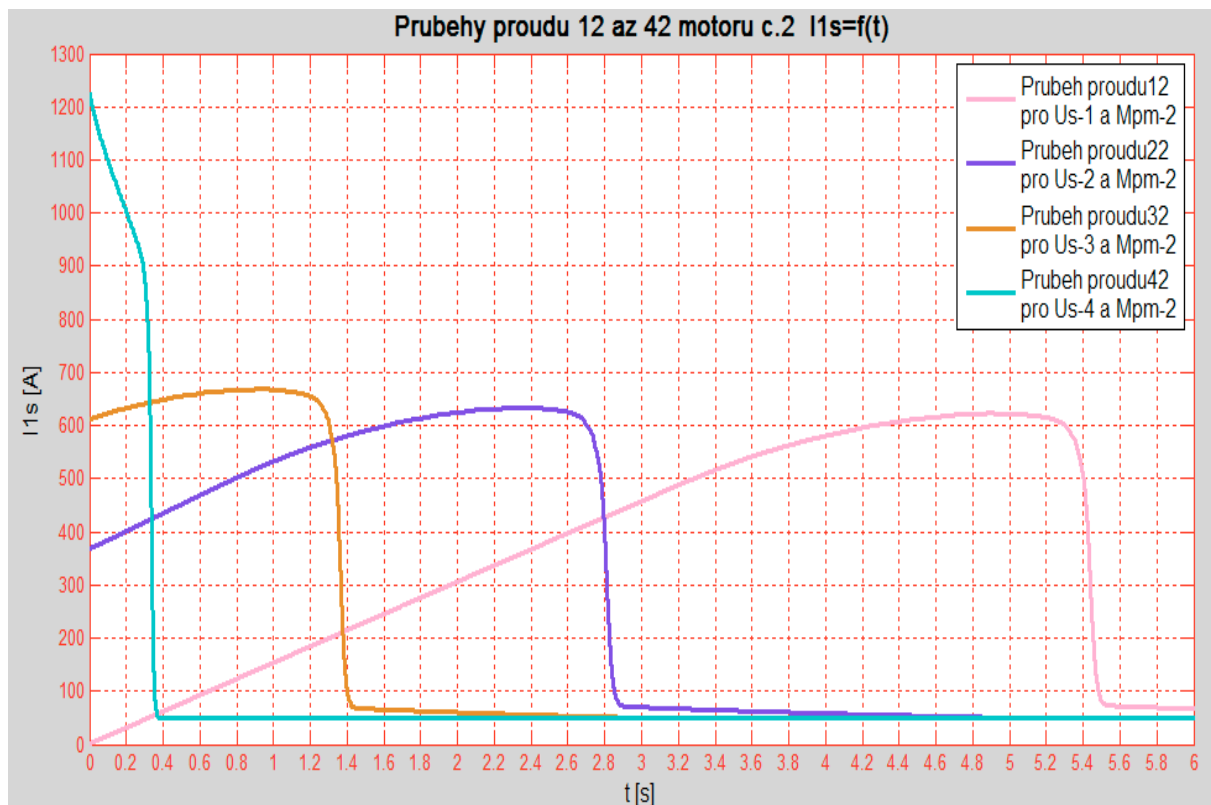
3.2.4 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-2}



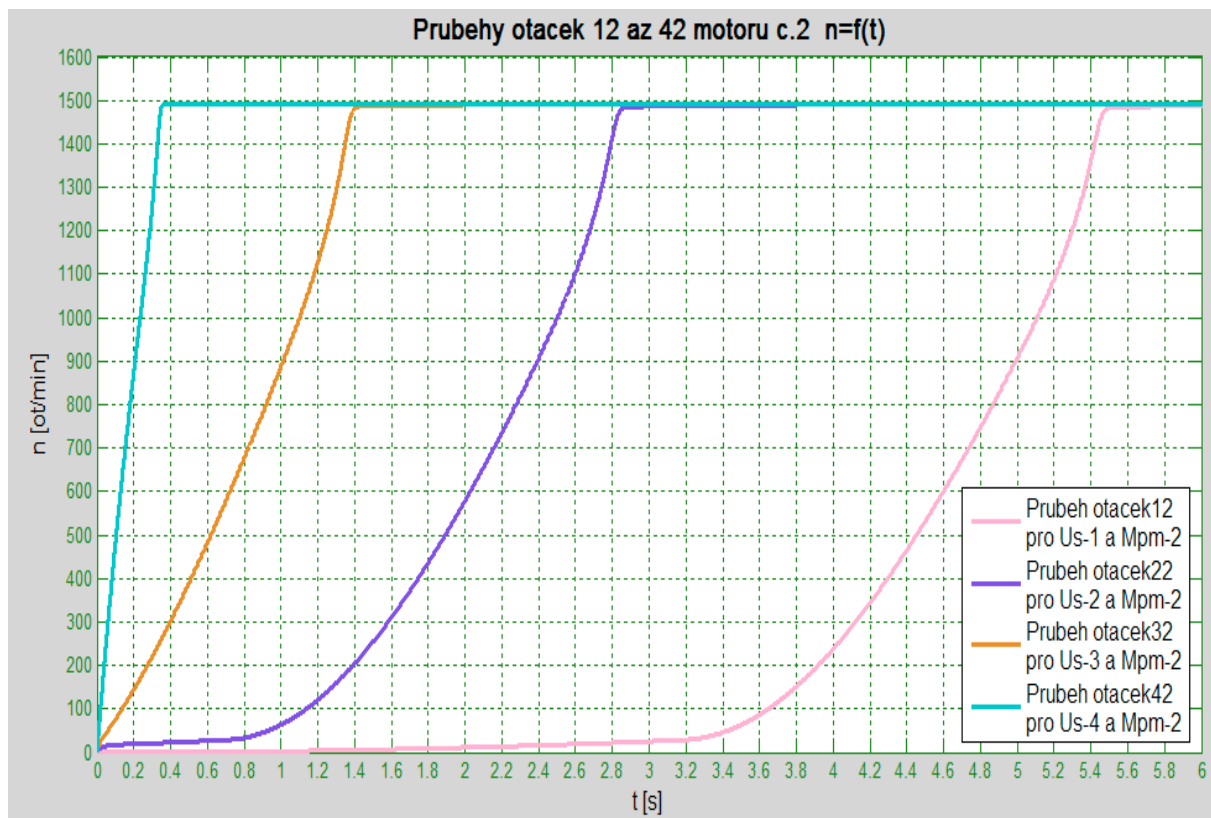
Obr. 47 - Celkové simulační schéma pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-2} = 600 \text{ Nm}$



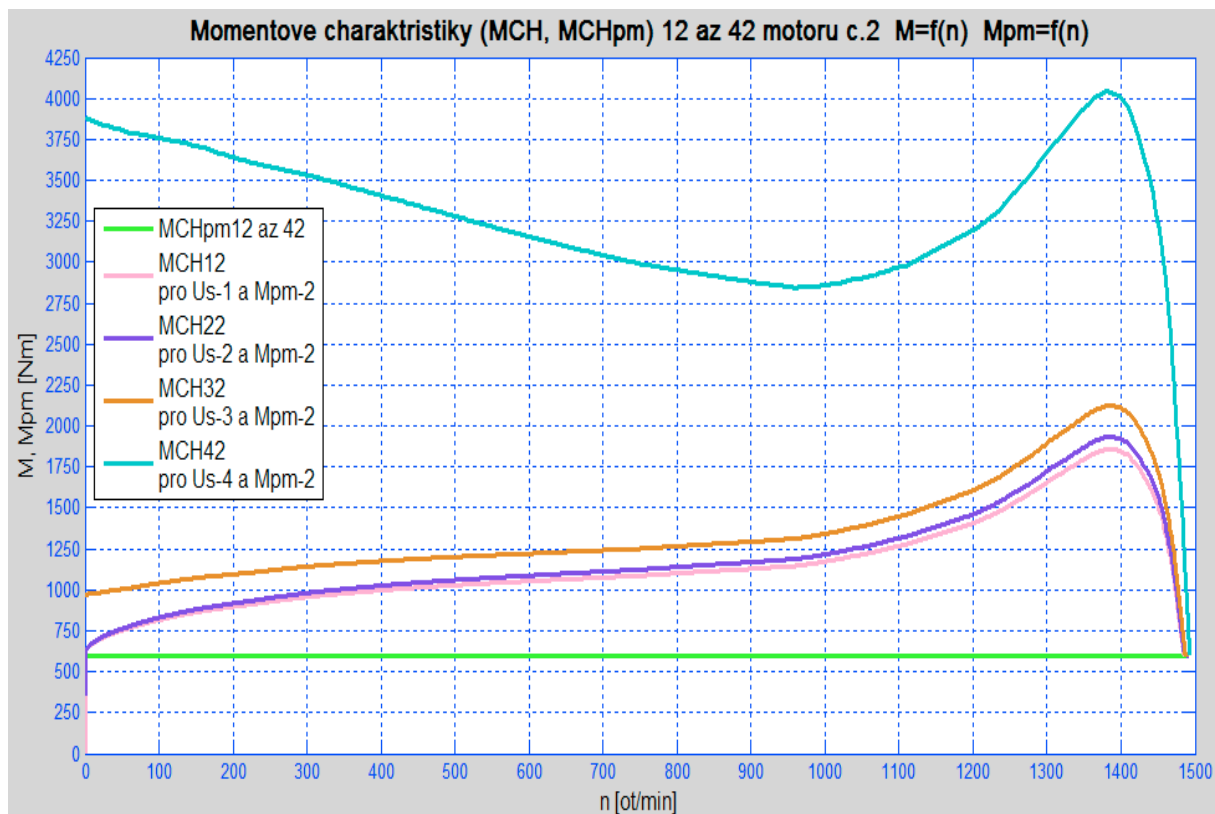
Obr. 48 - Průběhy momentů motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-2} = 600 \text{ Nm}$



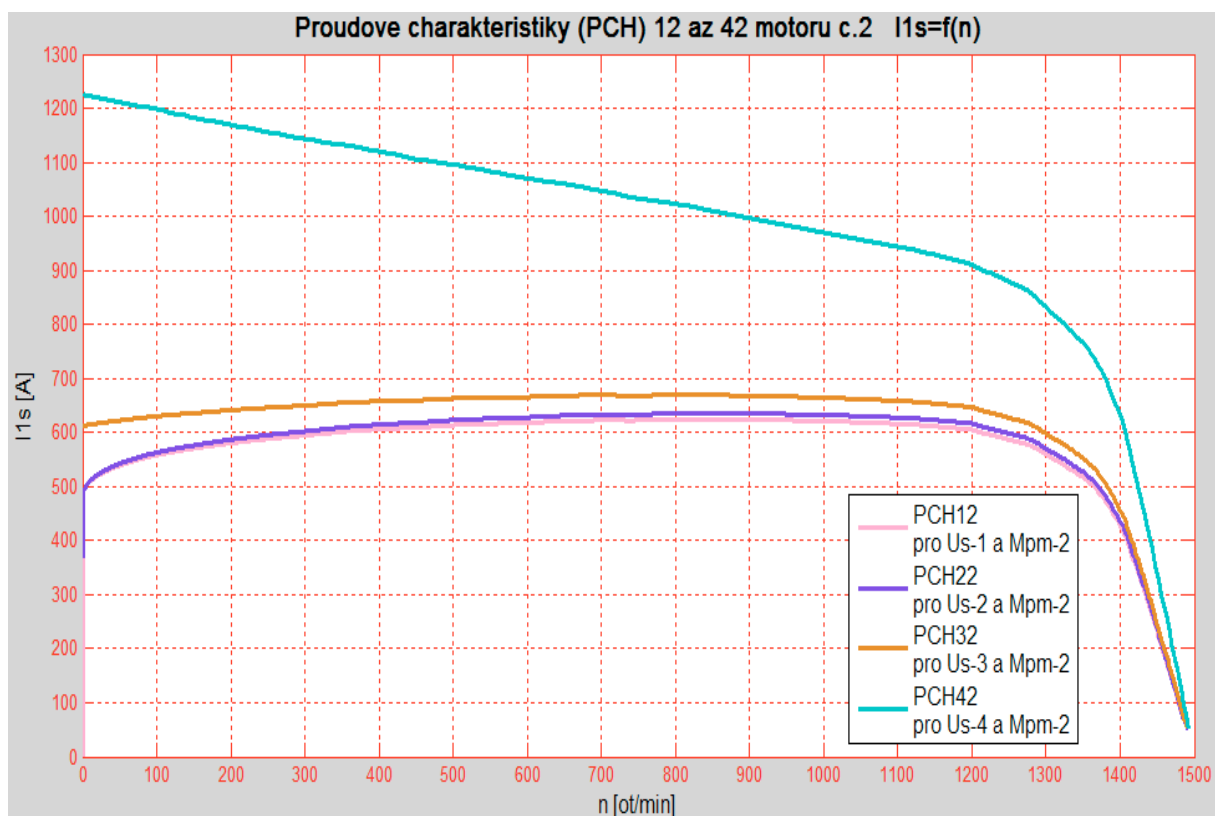
Obr. 49 - Průběhy proudů motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-2} = 600 \text{ Nm}$



Obr. 50 - Průběhy otáček motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-2} = 600 \text{ Nm}$

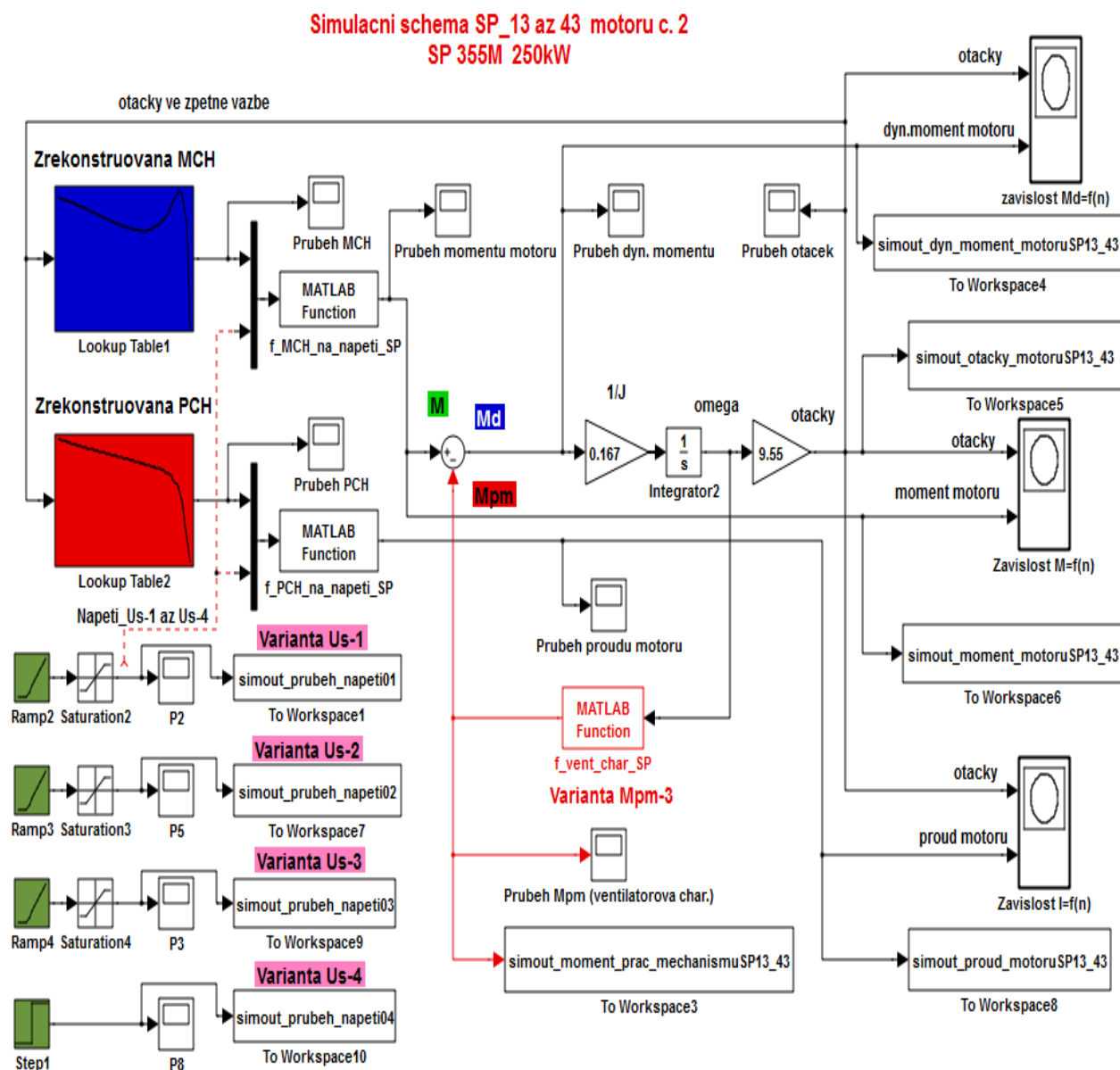


Obr. 51 - Momentové charakteristiky včetně charakteristiky M_{pm-2} motoru č. 2 (pro Us-1 až Us-4)

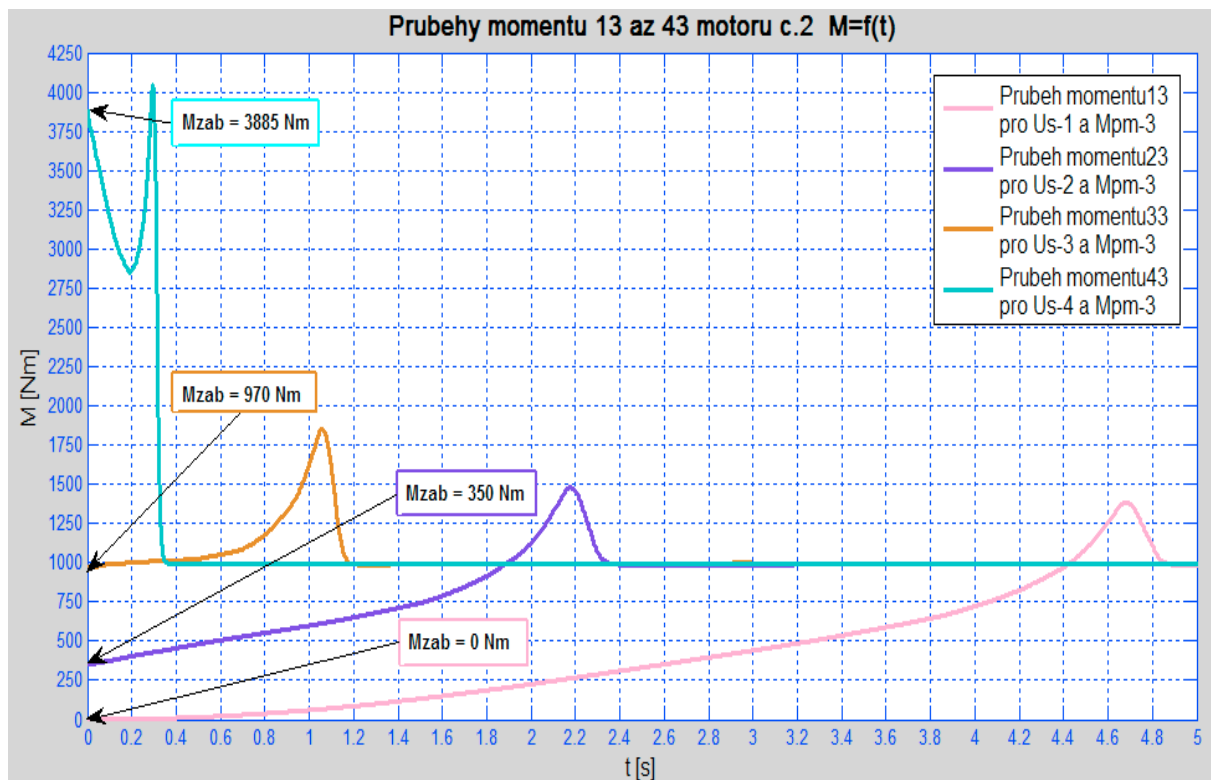


Obr. 52 - Proudové charakteristiky motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4, $M_{pm-2} = 600 Nm$

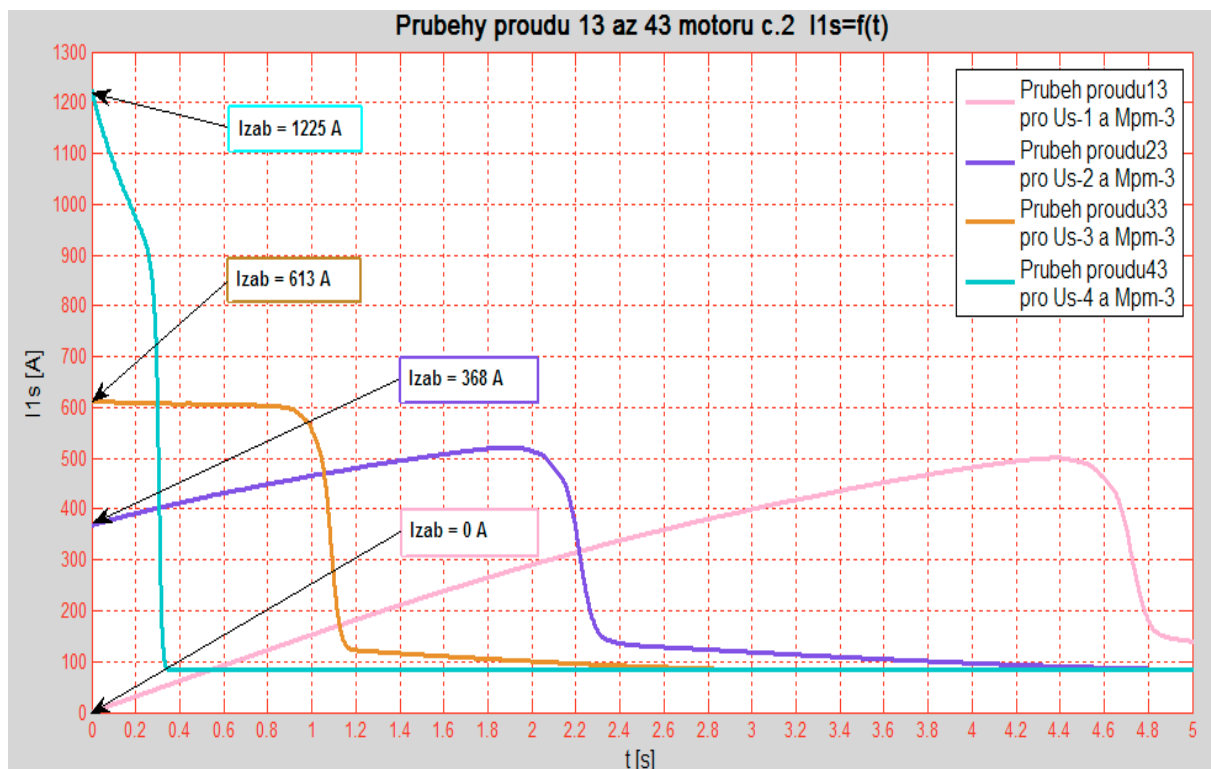
3.2.5 Celkové simulační schéma a jednotlivé průběhy pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} a M_{pm-3}



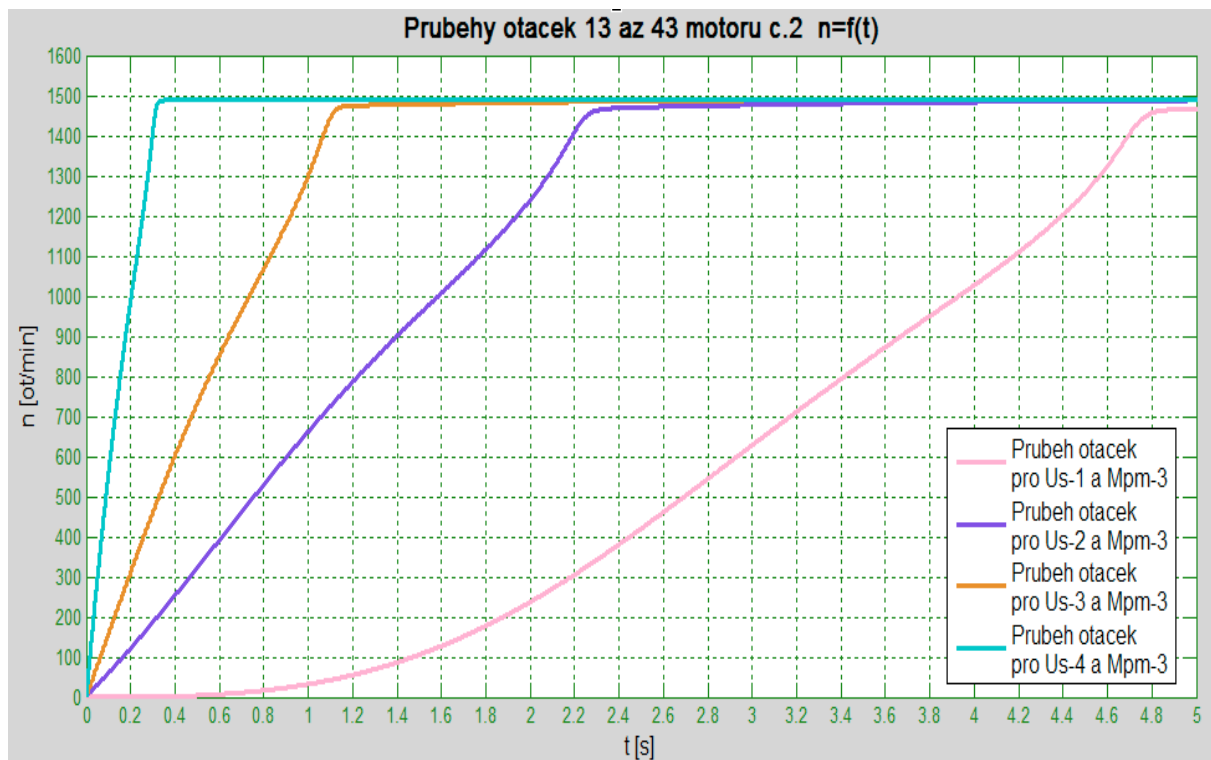
Obr. 53 - Celkové simulační schéma pro motor č. 2 s U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-3} = (0,04 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$



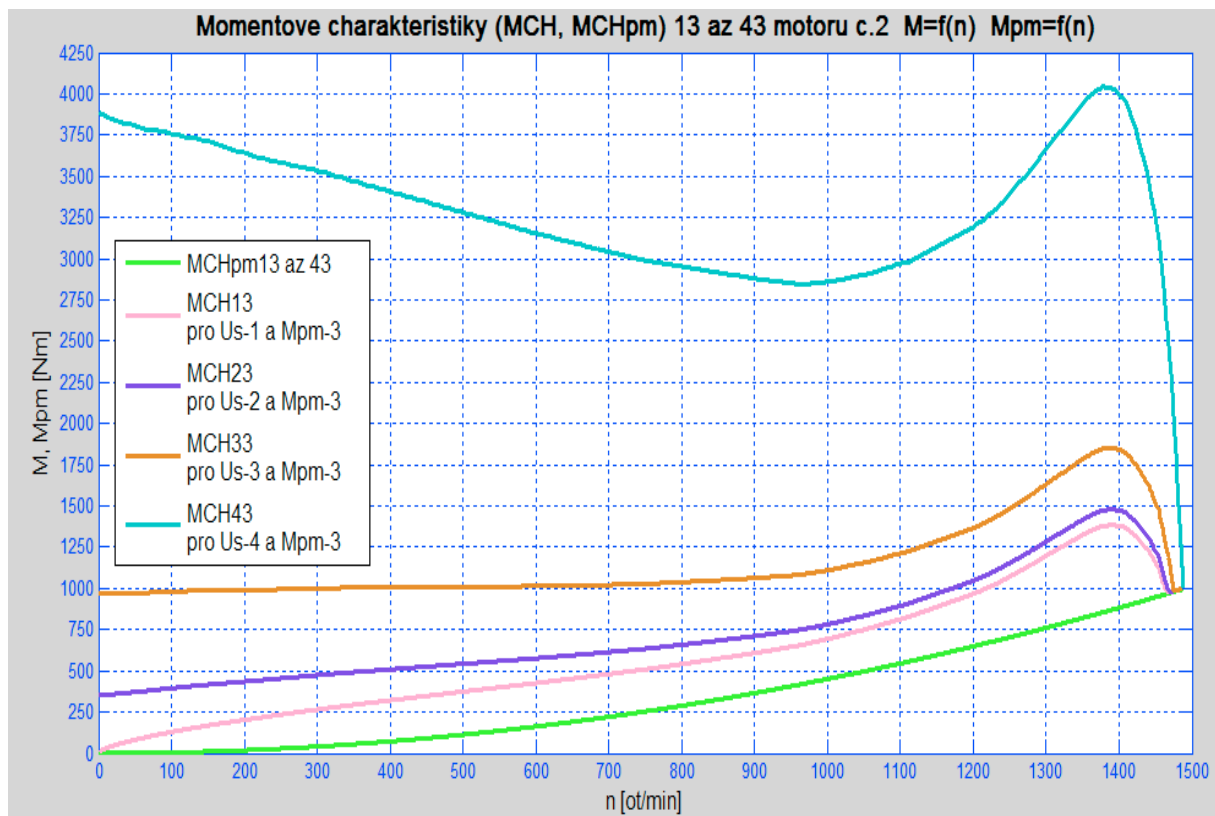
Obr. 54 - Průběhy momentů motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4 s hodnotami záběrných momentů pro $M_{pm-3} = (0,04 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$



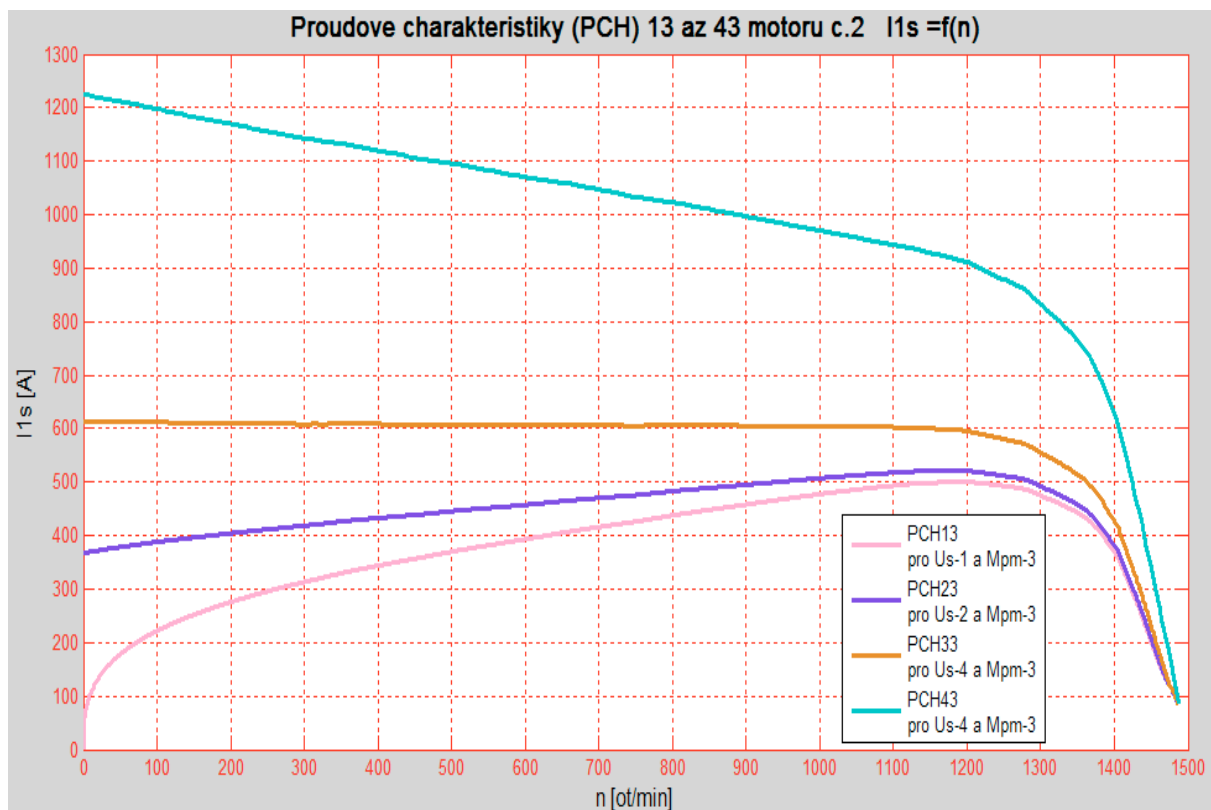
Obr. 55 - Průběhy proudů motoru č. 2 pro Us-1 až Us-4s hodnotami záběrných proudů pro $M_{pm-3} = (0,04 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$



Obr. 56 - Průběhy otáček motoru č. 2 pro $Us-1$ až $Us-4$, $M_{pm-3} = (0,04 \cdot \omega^2) \text{ Nm}$

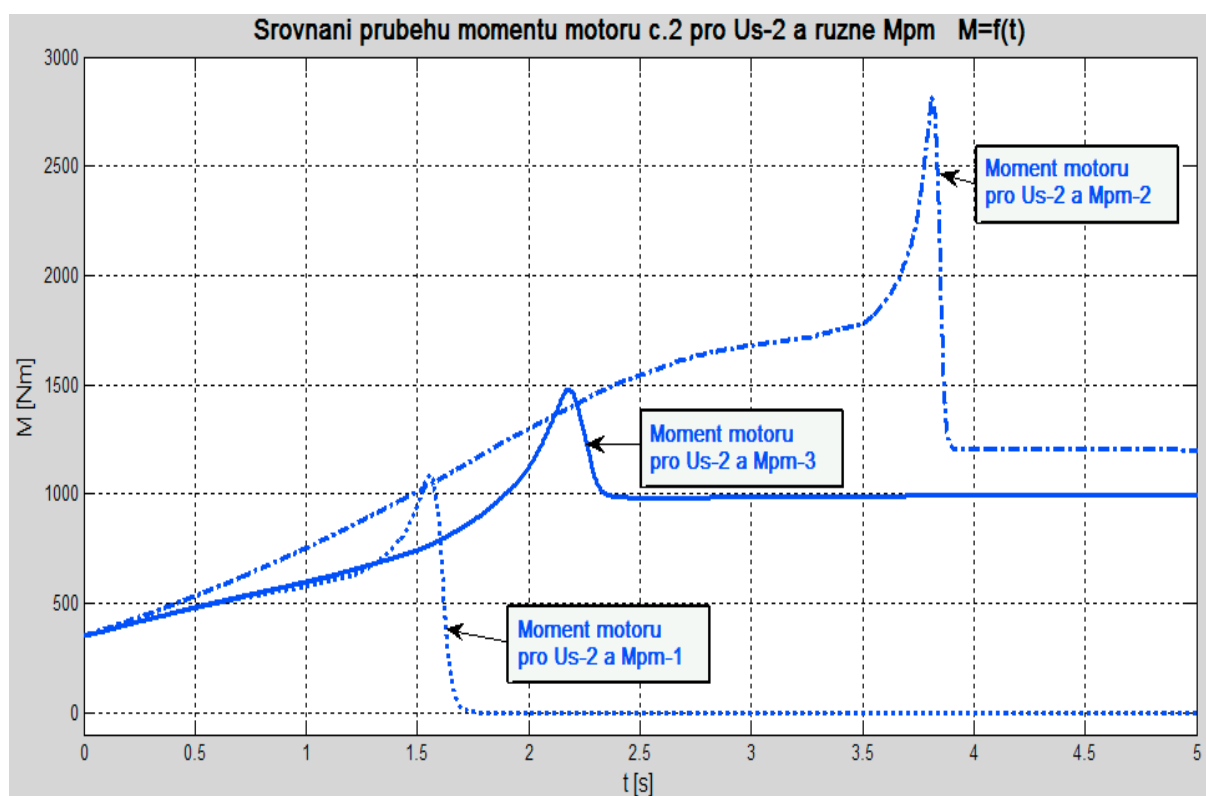


Obr. 57 - Momentové charakteristiky včetně charakteristiky M_{pm} -3 motoru č. 2 (pro U_{s-1} až U_{s-4})

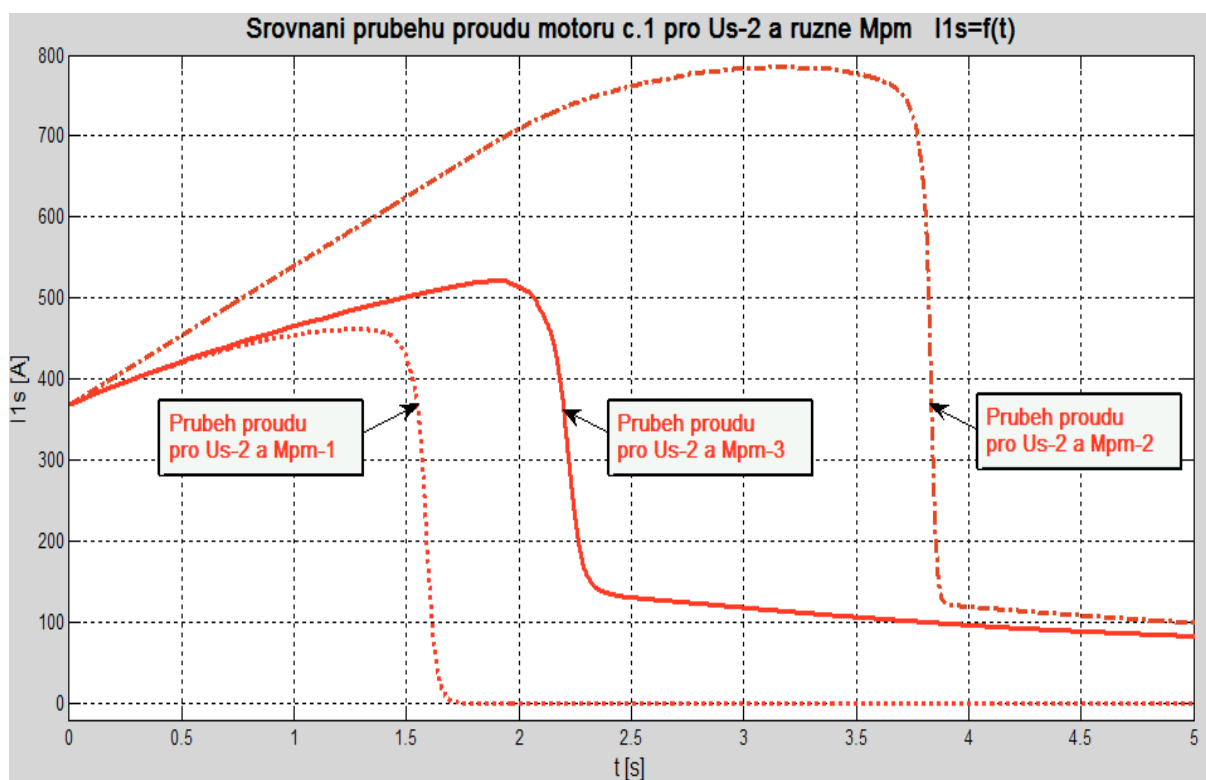


Obr. 58 - Proudové charakteristiky motoru č. 2 pro U_{s-1} až U_{s-4} , $M_{pm-3} = (0,04 \cdot \omega^2) Nm$

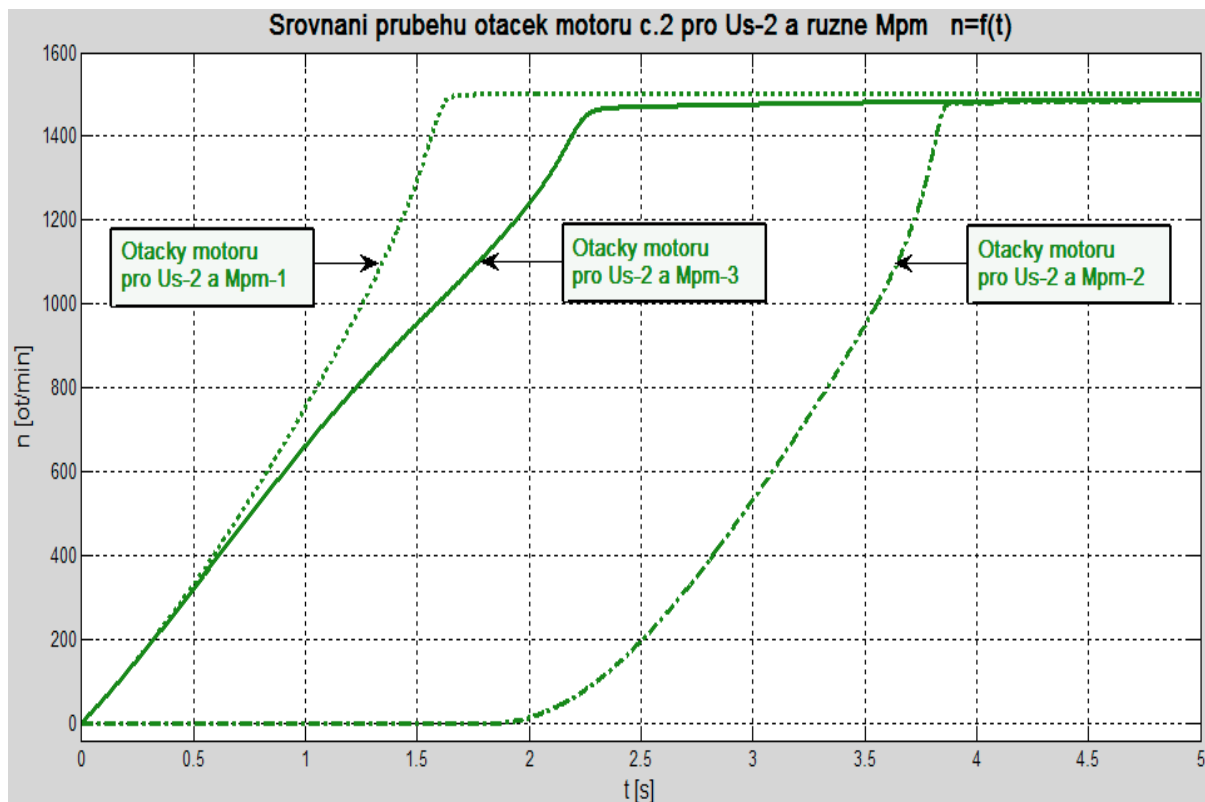
3.2.6 Srovnání jednotlivých průběhů motoru č. 2 pro vybrané napětí U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}



Obr. 59 - Srovnání průběhů momentů motoru č. 2 pro U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}



Obr. 60 - Srovnání průběhů proudů motoru č. 2 pro U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}



Obr. 61 - Srovnání průběhů otáček motoru č. 2 pro U_{s-2} a M_{pm-1} až M_{pm-3}

3.3 Celkové zhodnocení odsimulovaných průběhů

Jednotlivé simulace byly řešeny a realizovány na základě zvolených průběhů výstupních napětí ze softstartéru (obr. 16 a 39) a průběhů momentů pracovního mechanismu (obr. 17 a 40) pro oba vybrané asynchronní motory.

Simulace pohonu pro zatěžovací moment M_{pm-1} (nezatížený pohon) slouží v této práci k základní představě o chování předmětného pohonu a také k orientačnímu porovnávání jednotlivých odsimulovaných průběhů s ostatními průběhy. Hlavní pozornost byla tedy věnována simulaci pohonu pro zatěžovací moment M_{pm-2} (výtahová zatěžovací charakteristika) a M_{pm-3} (ventilátorová zatěžovací charakteristika).

Vstupní parametry, základní simulační schémata a odsimulované průběhy asynchronního motoru č. 1 (u kterého jsou k dispozici základní katalogové parametry od výrobce bez zadaných změřených charakteristik) je možno posoudit a vyhodnotit postupně dle obr. 16 až 38.

Tento AM byl řešen jako první. Byly odsimulovány jednak časové závislosti momentů, proudů a otáček motoru pro průběhy napětí U_{s-1} až U_{s-4} a pro průběhy zatěžovacích momentů M_{pm-1} až M_{pm-3} a jednak momentové a proudové charakteristiky tohoto motoru.

Srovnáním např. průběhů momentů, proudů v závislosti na čase pro zatěžovací moment M_{pm-2} (obr. 25, 26, 27) s průběhy pro zatěžovací moment M_{pm-3} (obr. 31, 32, 33) je možno vysledovat vysoké hodnoty momentů a proudů pro výtahovou charakteristiku (M_{pm-2}) a naopak provozně příznivé hodnoty momentů a proudů pro ventilátorovou charakteristiku (M_{pm-3}). Rovněž průběh otáček je příznivý u zatěžovacího momentu M_{pm-3} .

Při srovnání momentových a proudových charakteristik pro zatěžovací moment M_{pm-2} (obr. 28 a 29) s charakteristikami pro zatěžovací moment M_{pm-3} (obr. 34 a 35) je možno rovněž vysledovat především vysoké hodnoty záběrných proudů (obr. 29) u M_{pm-2} oproti M_{pm-3} (obr. 35) s konstatováním závěru, že je provozně žádoucí a potřebné používat asynchronní motory napájené ze softstartéru s určenou nastavenou rozběhovou rampou a především ve spojení se zvolenou ventilátorovou zatěžovací charakteristikou.

U grafů časových průběhů momentů a proudů pro vybraný zatěžovací moment M_{pm-3} byly pomocí nabídky „Tools → Data Cursor“ (v programové nadstavbě Simulink) odečteny a poté označeny hodnoty záběrných momentů a proudů (obr. 31 a 32). Tyto hodnoty korespondují s vypočtenými hodnotami těchto veličin, což dokazují výpočty (41) až (46). Rozdíly jsou zanedbatelné a jsou způsobeny zaokrouhlováním hodnot při odečtu ze zrekonstruovaných momentových a proudových charakteristik (obr. 14a, obr. 14b). Dle vypočtených a odečtených hodnot je možno si potvrdit kvadratickou závislost poklesu momentu a přibližně lineární závislost poklesu proudu na výstupním napětí ze softstartéru. Lineární závislost poklesu proudu je mírně ovlivněna tím, že byl u tohoto AM při řešení vztahu pro výpočet statorového proudu zahrnut i proud naprázdno. Tím bylo prakticky při simulacích ověřeno, jak se tento proud naprázdno projeví na odsimulovaných průbězích.

Vstupní parametry, základní simulační schémata a odsimulované průběhy asynchronního motoru č. 2 (u kterého jsou k dispozici kromě základních katalogových parametrů i zadané změřené charakteristiky od výrobce), je možno posoudit a vyhodnotit postupně dle obr. 39 až 61.

Tento AM byl řešen jako druhý v pořadí. Zde si je možno potvrdit prakticky stejné závěry jako u asynchronního motoru č.1, a to:

- srovnáním průběhů momentů, proudů a otáček v závislosti na čase pro M_{pm-2} (obr. 48, 49, 50) s průběhy pro M_{pm-3} (obr. 54, 55, 56)
- srovnáním momentových a proudových charakteristik pro M_{pm-2} (obr. 51 a 52) s průběhy pro M_{pm-3} (obr. 57 a 58)
- srovnáním odečtených hodnot záběrných momentů a proudů (obr. 54 a 55) s hodnotami vypočtenými, což dokazují výpočty (47) až (52)

Dle vypočtených a odečtených hodnot je možno si také pro tento AM potvrdit kvadratickou závislost poklesu momentu a lineární závislost poklesu proudu na výstupním napětí ze softstartéru. U tohoto AM nebyla v rámci sestavování základního simulačního modelu započítána hodnota proudu naprázdno.

U AM č. 2 je u odsimulovaných průběhů jednotlivých veličin možno vidět určité rozdíly oproti AM č. 1. Je to způsobeno tím, že zrekonstruované charakteristiky dle podkladů výrobce vyjadřují průběh momentové a proudové charakteristiky na základě praktických měření a zkoušek daného motoru (především se jedná o hodnotu záběrného momentu a záběrného proudu). Tyto podklady nelze zcela implementovat do charakteristik motoru simulovaných dle Klossova vztahu včetně skutečnosti, že při rozběhu motoru nebo chodu v nižších rychlostech se projevuje velkou měrou skinefekt, s kterým Klossův vztah nepočítá.

Při napájení asynchronního motoru se softstartérem s vybranou variantou rozběhové rampy označenou $Us-2$ (počáteční napětí 30 %, doba rozběhu 5 s), která se v praxi nejvíce blíží základnímu nastavení softstartéru, je možno pro zvolené zatěžovací momenty vysledovat a posoudit odpovídající průběhy momentu, proudu i otáček pro asynchronní motor č. 1 (obr. 36, 37, 38) a také pro asynchronní motor č. 2 (obr. 59, 60, 61) – v obou případech pro všechny tři zvolené zatěžovací momenty najednou. Zde se opět dle odsimulovaných průběhů potvrzuje skutečnost, že asynchronní motor napájený ze softstartéru je vhodný především pro pracovní mechanismy s ventilátorovou charakteristikou a naopak nevhodný a někdy i nepoužitelný pro pracovní mechanismy s výtahovou charakteristikou.

Závěr

V této bakalářské práci se podařilo prostřednictvím software Matlab - Simulink analyzovat na základě rozborů, zpracovaných modelů a následných simulací vlastnosti asynchronního motoru napájeného ze softstartéru, což bylo také cílem této práce. Ze zkušeností a praxe je známo, že asynchronní motory se hlavně v průmyslových podnicích spouštějí poměrně často pomocí přepínání hvězda - trojúhelník nebo přímým připojením na síť. Metoda, kdy je asynchronní motor připojen přímo na napájecí síť však má hned několik nedostatků. Především jsou to značně velké záběrové proudy, dále velké mechanické rázy a s nimi spojené vyšší opotřebení mechanických částí poháněných strojů a v neposlední řadě i velký pokles napětí v napájecí síti. V mnoha případech je proto výhodnější spouštět určitá zařízení s asynchronními motory pomocí měniče kmitočtu nebo softstartéru. V případě použití softstartéru není sice dosaženo při spouštění asynchronního motoru takové úrovně řízení jako u zapojení motoru s měničem kmitočtu, ale přesto je i zde možno zajistit omezení především záběrových proudů a při vhodně zvolené charakteristice pracovního mechanismu také řídit u motoru v určitém rozsahu i jeho otáčky. Je možno také konstatovat, že napojení motoru ze softstartérem je ekonomicky výhodnější a technicky jednodušší řešení.

Aby bylo možno relevantně porovnat výstupní průběhy u zařízení sestávajícího z asynchronního motoru napájeného ze softstartéru, které je přímo připojeno na síť se stejným zařízením, u kterého je použita jedna z rozběhových ramp, je jako jedna z variant průběhu napětí ze softstartéru použito plné napájecí napětí sítě (softstartér pracující v režimu „bypasse“).

Z uvedených rozborů a simulací vyplývá, že jako nejvhodnější a nejefektivnější varianta připadá v úvahu použití softstartérů např. pro pohony s čerpadly a ventilátory (což jsou vlastně zařízení s ventilátorovou zatěžovací charakteristikou), ale musíme při tomto použití asynchronního motoru napájeného ze softstartéru vzít v úvahu poměrně nízkou účinnost a výrazný pokles momentu.

Přínosem této práce je především skutečnost, že se povedlo získat a následně velmi přesně zrekonstruovat momentovou a proudovou charakteristiku asynchronního motoru z jejich základního tvaru poskytnutého výrobcem - společností DAMEL. Následně prostřednictvím použitého software Matlab - Simulink vytvořit a zpracovat simulační modely a schémata a provést jednotlivá posouzení a porovnání.

Rovněž bylo možno si v této práci názorně předvést, jak se u odsimulovaných průběhů projevuje vliv proudu naprázno a v závěru si na základě všech provedených simulací a jejich zhodnocení potvrdit, jak je důležité a nutné při sestavování pohonu se softstartérem vybrat a použít efektivní variantu rozběhové rampy a hlavně průběh momentu pracovního mechanismu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] NEBORÁK, Ivo. Mechatronické systémy. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB TU Ostrava, 2009.
- [2] Firemní katalog motorů SIEMENS [online]. [cit. 2010-11-12].
URL:< http://www.trafomot.cz/Data/files/katalogy/motory/aom/Defin_K13-0309CZ_AOM.pdf>
- [3] Firemní příručka ABB. Průvodce problematikou softstartérů [online]. [cit. 2010-11-12].
URL:< [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/\\$file/softstarter-%20handbook.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/$file/softstarter-%20handbook.pdf)>
- [4] DAMEL S.A. Návod k obsluze motorů DAMEL. K4-14-274, 2008.
- [5] Elektrické pohony. Výťah z přednášek 2011 [online]. [cit. 2010-11-25].
URL:< webs.zcu.cz/fel/kev/ep/EP_vytah_predn.doc>
- [6] Technická univerzita v Liberci. Střídavé motory [online]. [cit. 2010-11-25].
URL:< http://www.mti.tul.cz/files/evc/El_Str2_h.pdf>
- [7] SPŠE Dobruška. Asynchronní stroje [online]. [cit. 2010-12-18].
URL:< <http://www.spse.dobruska.cz/download/AM.pdf>>
- [8] VŠB Ostrava. Přednášky – asynchronní motory [online]. [cit. 2010-12-28].
URL:< http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf>
- [9] NEBORÁK, Ivo. Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. Monografie. VŠB TU Ostrava, 2002. 172s. ISBN 80-248-0083-7
- [10] FRAJTINGR, Jiří – KULE, Lumír. Elektrické pohony se střídavými pohony a polovodičovými měniči. Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 142s. ISBN 80-7082-919-2
- [11] KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Computer Press, a.s., Brno, 2006. 220s. ISBN 978-80-251-1448-3

Přílohy

Seznam příloh:

Příloha 1

Soubor m-file pro sestavení modelu motoru č. 1 z Klossova vztahu pro AM typu AOM 180L, 22kW

Příloha 2

Soubor m-file k řešení závislosti momentové charakteristiky motoru č. 2 typu SP1 355M, 250kW na napětí

Příloha 3

Soubor m-file k řešení závislosti proudové charakteristiky motoru č. 2 typu SP1 355M, 250kW na napětí

Příloha 4

Soubor m-file k sestavení ventilátorové charakteristiky M_{pm} motoru č. 1 typu AOM 180L, 22kW

Příloha 5

Soubor m-file k sestavení ventilátorové charakteristiky M_{pm} motoru č. 2 typu SP1 355M, 250kW

Jednotlivé přílohy s výpisem z Matlabu:

Příloha 1

Soubor m-file pro sestavení modelu motoru č. 1 z Klossova vztahu pro AM typu AOM 180L, 22kW

Název m-file: **f_AM_ZKV**

Výpis m-file:

```
% Model AM z Klossova vztahu (motor AOM 180L, 22kW)
% -----
% vstupy:
% vstup(1)      uhlova rychlost w (ve zpetne vazbe)
% vstup(2)      vstupni napeti Us
% =====
% vystupy:
% vystup (1)    moment motoru M
% vystup (2)    statorovy proud Ils

%=====
```

```
function [vystup]= f_AM_ZKV(vstup)
```

```
Un=400;
fn=50;
Mn=144;
p=2;
nn=1460;
Iln=40;
cosfil=0.87;
sinfil=sqrt(1-cosfil^2);
n=(vstup(1)*30)/pi;
ns=(fn*60)/p;
sn=(ns-nn)/ns;
s=(ns-n)/ns;
qm=2.5;
ku=vstup(2)/Un;
Mmax=Mn*qm*(ku^2);
szv=(sn*(qm+sqrt(qm^2-1)));
M=(2*Mmax*s*szv)/(s^2+szv^2);
```

```

Xk=1.404;
R21=0.179;
I2k=vstup(2)/(sqrt(R21^2+Xk^2));
I2s=I2k*sqrt((s^2+(s*szv)^2)/(s^2+szv^2));
I0=I1n*(sinfi1-cosfi1*(sn/szv))
cosfi2=sqrt(szv^2/(szv^2+s^2));
sinfi2=sqrt(1-cosfi2^2);
I1s=sqrt((I0+I2s*sinfi2)^2+(I2s*cosfi2)^2);
vystup(1)=M;
vystup(2)=I1s;
end

```

Příloha 2

Soubor m-file k řešení závislosti momentové charakteristiky motoru č. 2 typu SP1 355M, 250kW na napětí

Název m-file: **f_MCH_na_napeti_SP**

Výpis m-file:

```

% Závislost momentove char na napeti (motor SP 355M, 250kW)
% -----
% vstupy:
% vstup(1)      momentova char motoru MCH
% vstup(2)      napětí Us (Ured)
% =====
% vystupy:
% vystup (1)    momentova char motoru redukovana MCHred
% =====

function [vystup]= f_MCH_na_napeti_SP(vstup)

Un=1000;
ku=vstup(2)/Un
MCHred=vstup(1)*(ku^2)
vystup(1)=MCHred
end

```

Příloha 3

Soubor m-file k řešení závislosti proudové charakteristiky motoru č. 2 typu SP1 355M, 250kW na napětí

Název m-file: **f_PCH_na_napeti_SP**

Výpis m-file:

```

% Závislost proudove char na napeti (motor SP 355M, 250kW)
% -----
% vstupy:
% vstup(1)      proudova char motoru PCH
% vstup(2)      napětí Us (Ured)
% =====
% vystupy:
% vystup (1)    proudova char motoru redukovana PCHred
% =====

function [vystup]= f_PCH_na_napeti_SP(vstup)

Un=1000;
ku=vstup(2)/Un
PCHred=vstup(1)*ku
vystup(1)=PCHred
end

```

Příloha 4

Soubor m-file k sestavení ventilátorové charakteristiky M_{pm} motoru č. 1 typu AOM 180L, 22kW

Název m-file: **f_vent_char_AOM**

Výpis m-file:

```
% Ventilatorova charakteristika Mpm motoru AOM 180L, 22kW
% -----
% vstupy:
% vstup(1)      uhlova rychlost w (ve zpetne vazbe)
% =====
% vystupy:
% vystup (1)    moment Mpm
% =====

function [vystup]= f_vent_char_AOM(vstup)

w=vstup(1);
Mpm=0.0041*w^2;
vystup(1)=Mpm
end
```

Příloha 5

Soubor m-file k sestavení ventilátorové charakteristiky M_{pm} motoru č. 2 typu SP1 355M, 250kW

Název m-file: **f_vent_char_SP**

Výpis m-file:

```
% Ventilatorova charakteristika Mpm motoru SP1 355M, 250kW
% -----
% vstupy:
% vstup(1)      uhlova rychlost w (ve zpetne vazbe)
% =====
% vystupy:
% vystup (1)    moment Mpm
% =====

function [vystup]= f_vent_char_SP(vstup)

w=vstup(1);
Mpm=0.041*w^2;
vystup(1)=Mpm
end
```